

Trabajo Fin de Máster  
Máster Universitario en Ingeniería de Caminos,  
Canales y Puertos

Modelado hidrodinámico de la Flecha de El  
Rompido y su entorno

Autor: Cristina Aguilar Correa

Tutor: Alejandro López Ruiz

**Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2016







Trabajo Fin de Máster  
Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

# **Modelado hidrodinámico de la Flecha de El Rompido y su entorno**

Autor:  
Cristina Aguilar Correa

Tutor:  
Alejandro López Ruiz  
Profesor Ayudante Doctor

Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Máster: Modelado hidrodinámico de la Flecha de El Rompido y su entorno

Autor: Cristina Aguilar Correa

Tutor: Alejandro López Ruiz

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A mis profesores*



# Agradecimientos

---

En primer lugar agradezco a Antonio Ruiz, con quien contacté para realizar el proyecto y no dudó en guiarme desde el principio.

A mi tutor, Alejandro López, pues sin conocernos previamente hemos logrado trabajar juntos de una forma amena y agradable a la vez que productiva. Gracias por aportarme y enseñarme una visión del mundo de la ingeniería marítima diferente y permitirme con este proyecto aplicar todos los conceptos adquiridos anteriormente y otros nuevos desde un punto de vista más práctico.

No quisiera pasar por alto la oportunidad de agradecer a todos los profesores que he tenido durante la carrera, pues estoy segura de que con mucho de ellos seguiré en contacto durante mi vida laboral y ayudándonos mutuamente.

Y por supuesto gracias a mi familia y amigos por estar ahí, a aquellos que siempre han confiado en mí y me regalan día a día la motivación necesaria para lograr alcanzar nuevas metas.

Por último, también transmitir el lado sentimental de este proyecto que ha tenido para mí pues El Rompido, que es donde se enmarca el estudio, es el pueblo donde vivo y en el río Piedras me he bañado y navegado desde mi infancia.





# Resumen

---

La hidrodinámica del estuario del río Piedras (suroeste de España) está controlada por la acción conjunta del oleaje, las variaciones del nivel del mar y el viento. La particularidad de este estuario es que la parte final del río se encuentra separada del mar por una amplia flecha litoral (denominada flecha de El Rompido o de Nueva Umbría). Esta flecha ha crecido notablemente en los últimos años y el balance de sedimentos neto es tan alto que favorece el aterramiento de la desembocadura, afectando no sólo a la navegabilidad, sino también a las distintas actividades socioeconómicas de la zona.

Para garantizar la seguridad en la navegación, la Agencia Pública de Puertos de Andalucía draga el canal de navegación cada cierto periodo de tiempo. La última actuación de dragado se realizó en 2010 y recientemente se ha publicado la licitación de una nueva obra de dragado que se plantea que comience en julio de 2016.

A partir de batimetrías y datos proporcionados por una campaña de campo, se ha caracterizado la hidrodinámica del sistema. Estas medidas han permitido implementar, calibrar y validar un modelo hidrodinámico en la zona, obteniendo una buena correlación tanto para niveles (error medio cuadrático,  $RMSE=0.092$ ) como para las velocidades ( $RMSE=0.096$ ). Con esta herramienta se ha analizado la hidrodinámica que define la zona de estudio y confeccionado y analizado otro escenario con la obra de dragado en la canal de acceso al río cuya finalidad es analizar los efectos de esta obra en la hidrodinámica de la zona.

En las conclusiones de este trabajo se describe que el estuario consiste en un sistema mesomareal y semidiurno, con carrera de marea media de 2 m. La dirección de procedencia del oleaje más frecuente es SW, con alturas de olas entre 0 y 4.5 m y periodos pico entre 2 y 21 s, predominando las alturas de olas inferiores a 0.5 m y los periodos entre 4 y 6 s; las direcciones de viento más frecuentes son NNW y SW, con rango de velocidades de viento entre 0 y 20 m/s y más frecuentes 2 y 4 m/s.

En pleamar, la marea inunda una amplia zona de marismas y caños aguas arriba de la desembocadura, mientras que en bajamar, la profundidad en las canales de acceso al mar es insuficiente y los buques mayores no pueden acceder al o del mar en estas condiciones. Sin embargo, con la obra de dragado se consigue en todo momento una profundidad mínima de 1 m en ambas canales de acceso y la afección que esta obra puede tener en otras variables hidrodinámicas es reducida y, en tal caso, positiva. Por ejemplo, los esfuerzos cortantes se reducen, la variación de la amplitud de los armónicos de marea al adentrarse al río no experimenta variaciones bruscas y el prisma de marea se incrementa un 6 % en mareas vivas y un 2 % en mareas muertas.



# Índice general

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>III</b>
<b>Resumen</b>	<b>V</b>
<b>Índice general</b>	<b>VII</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>XI</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>XVII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivos principales . . . . .	2
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	3
1.3. Estructura . . . . .	3
<b>2. Zona de estudio</b>	<b>5</b>
2.1. Situación y descripción . . . . .	5
2.2. Geomorfología . . . . .	5
2.2.1. Evolución histórica de la flecha . . . . .	5
2.2.2. Otros cambios más recientes . . . . .	9
2.2.3. Evolución cíclica de los bajos de la flecha del Rompido . . . . .	10
2.2.4. Transporte litoral y profundidad de cierre . . . . .	12
2.2.5. Aportes sólidos del río . . . . .	13
2.3. Importancia sociocultural . . . . .	15
2.4. Actuaciones de dragado . . . . .	17
2.4.1. Dragado anterior (2009 - 2010) . . . . .	17
2.4.2. Nuevo dragado (2016) . . . . .	18
2.5. Clima marítimo . . . . .	18
2.5.1. Datos de partida . . . . .	18
2.5.2. Descripción general del oleaje en profundidades indefinidas . . . . .	19
2.5.3. Régimen medio . . . . .	22
2.5.4. Régimen extremal . . . . .	23
2.5.5. Variaciones del nivel del mar . . . . .	24

<b>3. Metodología</b>	<b>27</b>
3.1. Escenarios batimétricos	27
3.1.1. Escenario 1: Situación de partida	27
3.1.2. Escenario 2: Dragado de la canal principal de acceso	28
3.2. Descripción de las características del modelo numérico	31
3.2.1. Módulo FLOW	31
3.2.2. Módulo WAVE	32
3.3. Implementación del modelo en la zona de estudio	34
3.3.1. Periodo de tiempo	34
3.3.2. Grid	34
3.3.3. Batimetría	35
3.3.4. Archivo Wavecon	37
3.3.5. Parámetros del modelo	37
3.3.6. Condiciones de contorno	38
3.4. Calibración del modelo	38
3.4.1. Campaña de campo	38
3.4.2. Implementación de la calibración	41
3.4.3. Resultados de la calibración del modelo	44
3.4.4. Validación del modelo	51
<b>4. Resultados</b>	<b>53</b>
4.1. Introducción	53
4.2. Resultados del Escenario 1	54
4.2.1. Hidrodinámica en la zona de estudio	54
4.2.2. Correlaciones entre los agentes oleaje y viento con las variables hidrodinámicas	64
4.2.3. Análisis de armónicos de la marea astronómica	65
4.2.4. Elipses de marea en la zona de estudio	68
4.2.5. Prisma de marea	70
4.3. Resultados del Escenario II	72
4.3.1. Hidrodinámica en la zona de estudio	72
4.3.2. Análisis de armónicos de la marea astronómica	78
4.3.3. Elipses de marea en la zona de estudio	79
4.3.4. Prisma de marea	79
<b>5. Conclusiones</b>	<b>83</b>
<b>6. Futuras líneas de trabajo</b>	<b>85</b>
<b>A. Clima marítimo</b>	<b>87</b>
A.1. Datos para el estudio del clima marítimo de la zona de estudio	87
A.2. Oleaje	88
A.2.1. Descripción general del oleaje en profundidades indefinidas	88
A.2.2. Régimen medio de $H_s$ en profundidades indefinidas	94
A.2.3. Régimen extremal de $H_s$ en profundidades indefinidas	96
A.3. Viento	99

A.3.1. Descripción general del viento en profundidades indefinidas . . . . .	99
A.3.2. Régimen medio de $V_v$ en profundidades indefinidas . . . . .	103
A.3.3. Régimen extremal de $V_v$ en profundidades indefinidas . . . . .	105



## Índice de figuras

---

2.1. Localización del área de estudio en la desembocadura del río Piedras [Fuente: Morales et al. (2001)]. . . . .	6
2.2. Evolución histórica del estuario del río Piedras desde sistemas de islas barrera a flecha [Fuente: Morales et al. (2001)]. . . . .	7
2.3. Esquema de la apertura del ángulo de la flecha [Fuente: García y Cáceres (2012)]. . . . .	9
2.4. Serie fotográfica de los bajos de la desembocadura del río Piedras (1984-1999) [Fuente: HIDTMA (2000)]. . . . .	11
2.5. Modelo de evolución cíclica del sistema de deltas de reflujo asociados a la desembocadura del río Piedras [Fuente: Morales et al. (2001)]. . . . .	12
2.6. Balance de sedimentos en la desembocadura del río Piedras [Fuente: HIDTMA (2000)]. . . . .	13
2.7. Detalle del perfil de playa de la Flecha del Rompido para caracterizar la profundidad de cierre a gran escala [Fuente: CEDEX (2013)]. . . . .	14
2.8. Delimitación del Paraje Natural Marismas del Río Piedras y Flecha del Rompido [Fuente: J.A (2001)]. . . . .	15
2.9. Áreas de atraque en el río Piedras [Fuente: J.A (2009)]. . . . .	16
2.10. Serie temporal de altura de ola. . . . .	20
2.11. Serie temporal de velocidades de viento. . . . .	20
2.12. Rosa de oleaje. . . . .	21
2.13. Rosa de viento. . . . .	22
3.1. Batimetría de la situación de partida. . . . .	28
3.2. Definición de la obra de dragado. . . . .	29
3.3. Representación 3D de la zona de la desembocadura de la batimetría del Escenario 1. . . . .	30
3.4. Representación 3D de la zona de la desembocadura de la batimetría del Escenario 2. . . . .	30
3.5. Definición del contorno del grid empleado. . . . .	35
3.6. Recorte de la batimetría de precisión 50 x 50 m. . . . .	36
3.7. Batimetría con mayor precisión de la desembocadura - 10 x 10 m. . . . .	36
3.8. Definición de la batimetría empleada. . . . .	37
3.9. Ubicación de los instrumentos. . . . .	39
3.10. Datos medidos en la Estación E106/1. . . . .	40
3.11. Datos medidos en la Estación E106/2. . . . .	41

3.12. Corrección de los datos de nivel medidos en la Estación E106/1. . . . .	42
3.13. Calibración con todas las simulaciones - E106/1. . . . .	45
3.14. Calibración con todas las simulaciones - E106/2. . . . .	46
3.15. Calibración, periodo mayor con los parámetros calibrados - E106/1. . . . .	49
3.16. Calibración, periodo mayor con los parámetros calibrados - E106/2. . . . .	50
3.17. Variación del nivel del agua en la Estación E106/1. . . . .	51
4.1. Definición de dos posibles canales de navegación de los buques. . . . .	54
4.2. Elevación del nivel en la zona de estudio en cuatro instantes de tiempo: a) Pleamar y marea viva. b) Bajamar y marea viva. c) Pleamar y marea muerta. d) Bajamar y marea muerta. . . . .	55
4.3. Variación de la elevación del nivel a lo largo de los canales de navegación en cuatro instantes de tiempo: a) Pleamar y marea viva. b) Bajamar y marea viva. c) Pleamar y marea muerta. d) Bajamar y marea muerta. La línea verde representa el punto de división de los canales de levante y poniente y la línea magenta el comienzo de la actuación de dragado en la canal de poniente. La distancia 0 m se corresponde con el punto más interno del río. . . . .	56
4.4. Profundidad en la zona de estudio en cuatro instantes de tiempo: a) Pleamar y marea viva. b) Bajamar y marea viva. c) Pleamar y marea muerta. d) Bajamar y marea muerta. . . . .	58
4.5. Variación de la profundidad a lo largo de los canales de navegación en cuatro instantes de tiempo: a) Pleamar y marea viva. b) Bajamar y marea viva. c) Pleamar y marea muerta. d) Bajamar y marea muerta. La línea verde representa el punto de división de los canales de levante y poniente y la línea magenta el comienzo de la actuación de dragado en el canal de poniente. La distancia 0 m se corresponde con el punto más interno del río. . . . .	59
4.6. Velocidad de corriente en cuatro instantes de tiempo: a) Llenante y marea viva. b) Vaciante y marea viva. c) Llenante y marea muerta. d) Vaciante y marea muerta. . . . .	60
4.7. Variación de la velocidad de corriente a lo largo de los canales de navegación en cuatro instantes de tiempo: a) Llenante y marea viva. b) Vaciante y marea viva. c) Llenante y marea muerta. d) Vaciante y marea muerta. La línea verde representa el punto de división de los canales de levante y poniente y la línea magenta el comienzo de la actuación de dragado en la canal de poniente. La distancia 0 m se corresponde con el punto más interno del río. . . . .	61
4.8. Máximo esfuerzo cortante en cuatro instantes de tiempo: a) Llenante y marea viva. b) Vaciante y marea viva. c) Llenante y marea muerta. d) Vaciante y marea muerta. . . . .	62
4.9. Variación del máximo esfuerzo cortante a lo largo de los canales de navegación en cuatro instantes de tiempo: a) Llenante y marea viva. b) Vaciante y marea viva. c) Llenante y marea muerta. d) Vaciante y marea muerta. La línea verde representa el punto de división de los canales de levante y poniente y la línea magenta el comienzo de la actuación de dragado en la canal de poniente. La distancia 0 m se corresponde con el punto más interno del río. . . . .	63



4.10. Correlación entre los agentes y nivel del agua. . . . .	64
4.11. Correlación entre los agentes y velocidad de corriente. . . . .	65
4.12. Evolución de la amplitud y fase del componente de marea M2 a lo largo de los canales de navegación. La línea verde representa el punto de división de los canales de levante y poniente y la línea magenta el comienzo de la actuación de dragado en la canal de poniente. La distancia 0 m se corresponde con el punto más interno del río. . . . .	67
4.13. Evolución de la amplitud y fase del componente de marea S2 a lo largo de los canales de navegación. La línea verde representa el punto de división de los canales de levante y poniente y la línea magenta el comienzo de la actuación de dragado en la canal de poniente. La distancia 0 m se corresponde con el punto más interno del río. . . . .	67
4.14. Elipses de marea de la componente M2 en el río. . . . .	69
4.15. Elipses de marea de la componente M2 en la desembocadura. . . . .	69
4.16. Definición de la sección de cálculo del prisma de marea. . . . .	70
4.17. Variación de la velocidad frente al tiempo durante un periodo completo de onda y en 8 puntos que definen una sección transversal en el tramo final del río. En color azul se representa el periodo en marea viva, mientras que en color rojo se reproduce la marea muerta. . . . .	71
4.18. Variación de la elevación del nivel a lo largo de los canales de navegación tras la obra de dragado en cuatro instantes de tiempo: a) Pleamar y marea viva. b) Bajamar y marea viva. c) Pleamar y marea muerta. d) Bajamar y marea muerta. La línea verde representa el punto de división de los canales de levante y poniente y la línea magenta el comienzo de la actuación de dragado en la canal de poniente. La distancia 0 m se corresponde con el punto más interno del río. . . . .	73
4.19. Variación de la profundidad a lo largo de los canales de navegación tras la obra de dragado en cuatro instantes de tiempo: a) Pleamar y marea viva. b) Bajamar y marea viva. c) Pleamar y marea muerta. d) Bajamar y marea muerta. La línea verde representa el punto de división de los canales de levante y poniente y la línea magenta el comienzo de la actuación de dragado en el canal de poniente. La distancia 0 m se corresponde con el punto más interno del río. . . . .	74
4.20. Variación de la velocidad de corriente a lo largo del canal de navegación tras la obra de dragado en cuatro instantes de tiempo: a) Llenante y marea viva. b) Vaciante y marea viva. c) Llenante y marea muerta. d) Vaciante y marea muerta. La línea verde representa el punto de división de los canales de levante y poniente y la línea magenta el comienzo de la actuación de dragado en la canal de poniente. La distancia 0 m se corresponde con el punto más interno del río. . . . .	76

4.21. Variación del máximo esfuerzo cortante a lo largo del canal de navegación tras la obra de dragado en cuatro instantes de tiempo: a) Llenante y marea viva. b) Vaciante y marea viva. c) Llenante y marea muerta. d) Vaciante y marea muerta. La línea verde representa el punto de división de los canales de levante y poniente y la línea magenta el comienzo de la actuación de dragado en la canal de poniente. La distancia 0 m se corresponde con el punto más interno del río. . . . .	77
4.22. Evolución de la amplitud y fase del componente de marea M2 a lo largo de los canales de navegación tras la obra de dragado. La línea verde representa el punto de división de los canales de levante y poniente y la línea magenta el comienzo de la actuación de dragado en la canal de poniente. La distancia 0 m se corresponde con el punto más interno del río. . . . .	78
4.23. Evolución de la amplitud y fase del componente de marea S2 a lo largo de los canales de navegación tras la obra de dragado. La línea verde representa el punto de división de los canales de levante y poniente y la línea magenta el comienzo de la actuación de dragado en la canal de poniente. La distancia 0 m se corresponde con el punto más interno del río. . . . .	79
4.24. Elipses de marea tras la obra de dragado de la componente M2 en el río. En color rojo se han representado las elipses características del Escenario I y en color magenta las del Escenario II. . . . .	80
4.25. Elipses de marea tras la obra de dragado de la componente M2 en la desembocadura. En color rojo se han representado las elipses características del Escenario I y en color magenta las del Escenario II. . . . .	80
4.26. Variación de la velocidad frente al tiempo tras la obra de dragado durante un periodo completo de onda y en 8 puntos que definen una sección transversal en el tramo final del río. En color azul se representa el periodo en marea viva, mientras que en color rojo se reproduce la marea muerta. .	81
A.1. Localización del punto SIMAR empleado. . . . .	87
A.2. Serie temporal de altura de ola significativa. . . . .	88
A.3. Histograma de alturas de ola. . . . .	89
A.4. Histograma de periodos pico. . . . .	91
A.5. Histograma de direcciones media de procedencia. . . . .	92
A.6. Gráfico de dispersión $H_s - T_p$ . . . . .	92
A.7. Gráfico de dispersión $T_p - \theta$ . . . . .	93
A.8. Gráfico de dispersión $H_s - \theta$ . . . . .	93
A.9. Rosa de oleaje. . . . .	94
A.10. Función de densidad tipo Weibull para el régimen medio de altura de ola. .	95
A.11. Función de distribución tipo Weibull para el régimen medio de altura de ola. . . . .	96
A.12. Picos de altura de ola sobre umbral con $H_{su} = 1,5m$ . . . . .	97
A.13. Función de densidad tipo GEV para el régimen extremal de altura de ola. .	98
A.14. Función de distribución tipo GEV para el régimen extremal de altura de ola.	98
A.15. Serie temporal de velocidades de viento. . . . .	99
A.16. Histograma de velocidades de viento. . . . .	100
A.17. Histograma de direcciones medias de procedencia. . . . .	101

A.18. Gráfico de dispersión $V_v - \theta_v$ . . . . .	102
A.19. Rosa de viento. . . . .	102
A.20. Función de densidad tipo Weibull para el régimen medio de velocidad de viento. . . . .	104
A.21. Función de distribución tipo Weibull para el régimen medio de velocidad de viento. . . . .	104
A.22. Picos de velocidad de viento sobre umbral con $V_{vu} = 8,5m$ . . . . .	105
A.23. Función de densidad tipo GEV para el régimen extremal de velocidad de viento. . . . .	106
A.24. Función de distribución tipo GEV para el régimen extremal de velocidad de viento. . . . .	107



# Índice de tablas

---

2.1. Tasa de crecimiento de la flecha y actuaciones antrópicas. . . . .	8
2.2. Tabla resumen del régimen medio para la altura de ola. . . . .	22
2.3. Tabla resumen del régimen medio para la velocidad de viento. . . . .	23
2.4. Tabla resumen del régimen extremal para la altura de ola. . . . .	23
2.5. Tabla resumen del régimen extremal para la velocidad de viento. . . . .	24
2.6. Armónicos de marea (Huelva 5). . . . .	25
3.1. Ubicación de las campañas de medida de corrientes. . . . .	39
3.2. Fechas de las campañas de medida de corrientes. . . . .	40
3.3. Simulaciones realizadas para calibrar el modelo. . . . .	43
3.4. Parámetros de correlación entre los resultados del modelo y campaña de campo en la Estación E106/1. . . . .	47
3.5. Parámetros de correlación entre los resultados del modelo y campaña de campo en la Estación E106/2. . . . .	48
3.6. Parámetros de correlación con los parámetros calibrados un periodo mayor. . . . .	50
4.1. Instantes de representación de la elevación y profundidad. . . . .	55
4.2. Instantes de representación de la velocidad de corriente y máximo esfuerzo cortante. . . . .	58
A.1. Porcentaje de alturas de ola. . . . .	89
A.2. Porcentaje de periodos pico. . . . .	90
A.3. Porcentaje de direcciones media de procedencia. . . . .	91
A.4. Parámetros de la distribución tipo Weibull para el régimen medio de altura de ola. . . . .	95
A.5. Tabla resumen del régimen medio para la altura de ola. . . . .	96
A.6. Parámetros de la distribución tipo GEV para el régimen extremal de altura de ola. . . . .	97
A.7. Tabla resumen del régimen extremal para la altura de ola. . . . .	99
A.8. Porcentaje de velocidades de viento. . . . .	100
A.9. Porcentaje de velocidades de viento. . . . .	101
A.10. Parámetros de la distribución tipo Weibull para el régimen medio de velocidad de viento. . . . .	103
A.11. Tabla resumen del régimen medio para la velocidad de viento. . . . .	105
A.12. Parámetros de la distribución tipo GEV para el régimen extremal de velocidad de viento. . . . .	106

A.13. Tabla resumen del régimen extremal para la velocidad de viento. . . . .	107
---	-----

---

# Capítulo 1

## Introducción

---

### 1.1. Introducción

La flecha litoral del Rompido se encuentra ubicada al suroeste de la provincia de Huelva. Constituye un gran cuerpo arenoso con una longitud de entre 11.5 y 12 km y que se extiende paralelo a la costa, separando y cerrando el estuario del río Piedras del océano Atlántico. El conjunto de la flecha constituye un enclave de enorme valor paisajístico y ambiental, siendo único en todo el litoral andaluz, tanto por sus dimensiones (más de 10 km de longitud y entre 350 – 750 m de anchura) como por su geodinámica y geomorfología peculiares. Estas características, unidas a la riqueza de su flora y fauna, llevaron al conjunto (2.530 ha) a ser declarado Paraje Natural mediante la Ley 2/1989, de 18 de julio, por la que se aprueba el inventario de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía. También es Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA) desde el año 2002 y se encuentra propuesto como Lugar de Interés Comunitario (LIC).

La flecha del Rompido y el río Piedras conforman un estuario que ha sido alterado en los últimos años debido a la regulación del río. La hidrodinámica y configuración morfológica de los estuarios son el producto de la incidencia del oleaje, la propagación de la onda de marea y las descargas fluviales, modificados por los cambios relativos del nivel del mar y el escenario climático. Como resultado de todas estas interacciones, dependiendo de la energía relativa de cada uno, el estuario puede seguir diferentes patrones de evolución y desarrollo (Davis y Clifton, 1987; Nichol y Boyd, 1993).

Esta formación sedimentaria, constituida a partir de antiguas islas barrera, se encuadra en un área de clima mediterráneo con marcada influencia oceánica. La desembocadura de la ría del Piedras está fuertemente condicionada por la dinámica litoral y, tanto la flecha como el sistema de deltas de marea, están fuertemente influenciados por los agentes hidrodinámicos marinos: la marea el viento y el oleaje. Además, debido a la regulación del río desde mediados del siglo XX, la influencia fluvial en el estuario y la desembocadura se ha visto fuertemente reducida.

La flecha que delimita el estuario del río Piedras (llamada de El Rompido o de Nueva Umbría) ha sido estudiada desde diferentes puntos de vista por varios autores durante los últimos 30 años. Dabrio (1982) describió la evolución que ha sufrido la flecha desde sus orígenes. Dabrio et al. (1980) y Dabrio (1989) estudiaron la dinámica sedimentaria de la flecha y describieron que el crecimiento longitudinal de la flecha era consecuencia de periodos alternos de predominancia del oleaje y las mareas. Dabrio (1981) describe las

estructuras sedimentarias generadas en la zona expuesta al oleaje. Por otra parte, Borrego y Pendón (1989) caracterizaron el ciclo mareal en la desembocadura del río Piedras y Borrego et al. (1993) describieron la estratigrafía en el interior del estuario y sugirieron otra explicación sobre el crecimiento de la flecha, contrario a Dabrio (1989), consistente en la respuesta del sistema ante la reducción del prisma de marea, consecuencia del relleno del interior del estuario. Borrego et al. (1992) estudiaron los efectos de las actuaciones antrópicas en los ritmos de crecimiento de la flecha y Borrego et al. (1995) definieron un modelo cíclico de evolución para explicar los cambios morfodinámicos observados en el sistema. Por último, por parte de la administración pública, HIDTMA (2000) y CEDEX (2013) realizaron estudios de la dinámica litoral de la costa de Huelva, describiendo los problemas existentes y planteando soluciones a estos.

Por supuesto, no se han citado todos los estudios y autores que han investigado esta zona pero sí los más relevantes. Como se puede apreciar, ninguno de los estudios analizados se ha centrado en caracterizar en detalle la hidrodinámica de la zona ni han realizado un estudio preciso de la influencia que puedan tener posibles dragados que aseguren la navegabilidad de la desembocadura. Con este Trabajo Fin de Máster se pretenden resolver estos problemas, ya que, para estudiar cualquier aspecto relacionado con la flecha o la desembocadura del río Piedras, un análisis hidrodinámico de la zona de estudio es de vital importancia y considerado la base de cualquier otro estudio posterior. Por tanto, el estudio realizado en este Trabajo Fin de Máster beneficiará a los futuros investigadores que analicen la zona.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivos principales**

Los objetivos de este trabajo son principalmente dos. El primero de ellos consiste en desarrollar una caracterización hidrodinámica de la zona de estudio muy completa y exhaustiva, que permita a otros investigadores o ingenieros conocer la hidrodinámica de la flecha del Rompido con rigor. Hasta ahora se han realizado y publicado numerosos artículos en relación a la flecha del Rompido pero ninguno ha descrito con detalle la hidrodinámica de todo el estuario, centrándose únicamente en problemas locales y sin llevar a cabo una caracterización exhaustiva de los agentes climáticos que influyen en dicha hidrodinámica.

El segundo de ellos es determinar la afección provocada por una obra de dragado de la canal principal de acceso en la hidrodinámica de la zona. Actualmente existen dos canales de acceso desde el río Piedras al mar, pero en ambos el calado ha ido disminuyendo con el paso del tiempo debido al carácter dinámico de la desembocadura, llegando a ser insuficiente en bajamar para la flota de buques que actualmente fondean en el interior del río Piedras. Se modificará la batimetría simulando el dragado de una canal de acceso de dimensiones 650 m x 50 m y cota -1 m bajo la bajamar máxima viva equinoccial.



### 1.2.2. Objetivos específicos

Para llevar a cabo los anteriores objetivos principales, estos se definirán a partir de los siguientes objetivos específicos:

- Descripción de la zona de estudio, tanto su geomorfología como el clima marítimo.
- Definición de los escenarios en los que se caracterizará la hidrodinámica.
- Implementación de un modelo numérico avanzado.
- Obtención de las variables que caracterizan la hidrodinámica.
- Búsqueda de correlaciones entre los agentes y variables hidrodinámicas.
- Estudio de la variación de los componentes de marea a lo largo del canal de navegación.
- Cálculo del prisma de marea.
- Análisis comparativo detallado de los dos escenarios.

## 1.3. Estructura

El trabajo se organiza de la siguiente manera. La zona de estudio se describe en el Capítulo 2, detallando la localización, geomorfología, importancia sociocultural, actuaciones de dragado realizadas y planteadas en la zona de estudio, así como, resumen del análisis de clima marítimo realizado. En el Capítulo 3 se explica la metodología que se ha seguido para implementar y calibrar el modelo numérico, así como para simular los escenarios definidos. También se especifican las características del modelo empleado: el Delft3D. El Capítulo 4 presenta todos los resultados analizados de las simulaciones, estructurado en resultados hidrodinámicos del Escenario 1 (situación sin dragado), del Escenario 2 (configuración con el dragado) y comparación entre ambos para describir la afección que la obra de dragado tiene en la hidrodinámica de la zona. Finalmente, las conclusiones de este trabajo se resumen en el Capítulo 5 y en el Capítulo 6 se definirán las futuras líneas de trabajo. En el Apéndice A se detalla el análisis al completo que se ha realizado del clima marítimo.



---

## Capítulo 2

# Zona de estudio

---

### 2.1. Situación y descripción

La zona de estudio se localiza en el suroeste de la Península Ibérica, concretamente en la provincia de Huelva en el término municipal de Cartaya, ocupando una extensión de 87.500 ha (Figura 2.1). La fecha litoral del Rompido se ubica en la desembocadura del río Piedras, al oeste de la del río Odiel, con una extensa marisma mareal. Esta flecha constituye una barra arenosa de 12 km de longitud que discurre paralela a la costa con un acusado dinamismo, que cierra y prolonga la desembocadura del río, creando una gran extensión de bajos arenosos de alta productividad. Además, la zona presenta un alto valor ecológico, con presencia de especies como el camaleón o la nutria, citas de lince ibérico y abundante conejo. Se realizan actividades de marisqueo, agricultura y turismo (HIDTMA, 2000).

### 2.2. Geomorfología

#### 2.2.1. Evolución histórica de la flecha

La flecha del Rompido es una larga lengua de arena que se ha ido formando por la interferencia que el transporte sólido litoral a lo largo de la costa hace con la corriente de salida y de flujo mareal de la desembocadura del río Piedras.

El punto de partida de la evolución reciente de la costa de Huelva se produjo hace unos 11.000 años (Morales y Borrego, 2008) cuando el nivel del mar comenzó a elevarse a causa de la Transgresión Flandriense. A lo largo de este ascenso progresivo de más de 100 metros, las aguas invadieron los cursos bajos de los valles fluviales convirtiéndolos en amplios entrantes o estuarios, a la vez que las olas atacaban los salientes costeros tallando acantilados como los del Rompido. Dicha fase transgresiva concluyó hace entre 6000-5500 años, cuando el índice de subida disminuyó drásticamente hasta alcanzar el nivel actual. En una segunda fase, la llegada de arena procedente de la erosión de estos acantilados y del aporte fluvial dio lugar a la generación de sistemas de islas barrera y playas adosadas a los frentes acantilados y al comienzo de la colmatación sedimentaria de los estuarios, generando barreras arenosas en sus bocanas y cuerpos de acreción estuarina submareales en su parte interna.

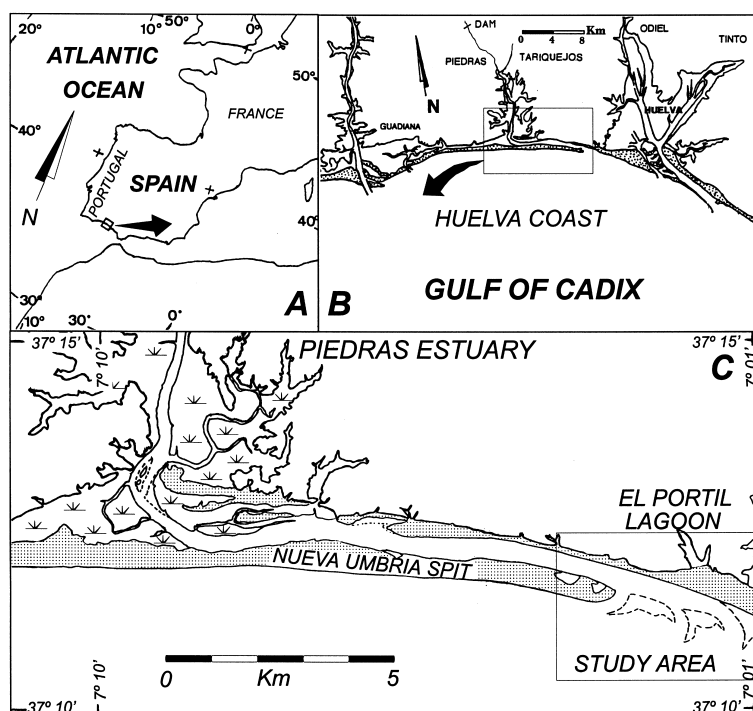


Figura 2.1: Localización del área de estudio en la desembocadura del río Piedras [Fuente: Morales et al. (2001)].

Como se puede observar en el panel superior de la figura 2.2 (Morales et al., 2001), en la primera mitad del siglo XIX existían numerosas islas barreras consistentes en islas arenosas frente a la costa a cuyo abrigo se encontraban las marismas. Entre dichas islas se abrían pasos o rompidos que comunicaban las marismas con el mar. Uno de ellos estaba frente al río Piedras y separaba la Isla de Palo de la isla de Levante. Entre esta última isla y la costa quedaba el canal de Marijata también llamado estero de Misanueva.

En un primer momento, el carácter abierto de los estuarios permitió que enormes volúmenes de agua entrando y saliendo de los mismos generaran fuertes corrientes mareales y se formaran barras mareales longitudinales en forma de huso. Sin embargo, posteriormente, con una mayor colmatación de los estuarios, las corrientes mareales fueron disminuyendo, permitiendo el desarrollo de formas arenosas.

De esta forma se pasa a una fase posterior en la que los estuarios se van rellenando con cuerpos intermareales separados por canales anastomosados y, a finales del siglo XIX, se habían cerrado los tres rompidos que existían en la costa de Huelva y las islas barreras formaban una playa continua desde Isla Cristina hasta la Punta del Gato. La isla de Levante quedó muy reducida en su extensión debido a la importante erosión que se produjo debido a las nuevas condiciones dinámicas (Panel intermedio de la figura 2.2).

En la actualidad han continuado las tendencias descritas (Tercer panel de la figura 2.2) y la flecha del Rompido ha crecido hacia levante a razón de unos 35 metros por año, alcanzando la Punta de la Barra o del Gato casi la laguna del Portil. En el interior de los estuarios, los cuerpos intermareales han sido colonizados por la vegetación constitu-

yendo grandes extensiones de marisma.

Todo el proceso de evolución descrito ha tenido un carácter continuo y progresivo, aunque Morales y Borrego (2008) añaden que este ha sido interrumpido al menos en 14 ocasiones por eventos puntuales de alta energía como son los tsunamis.

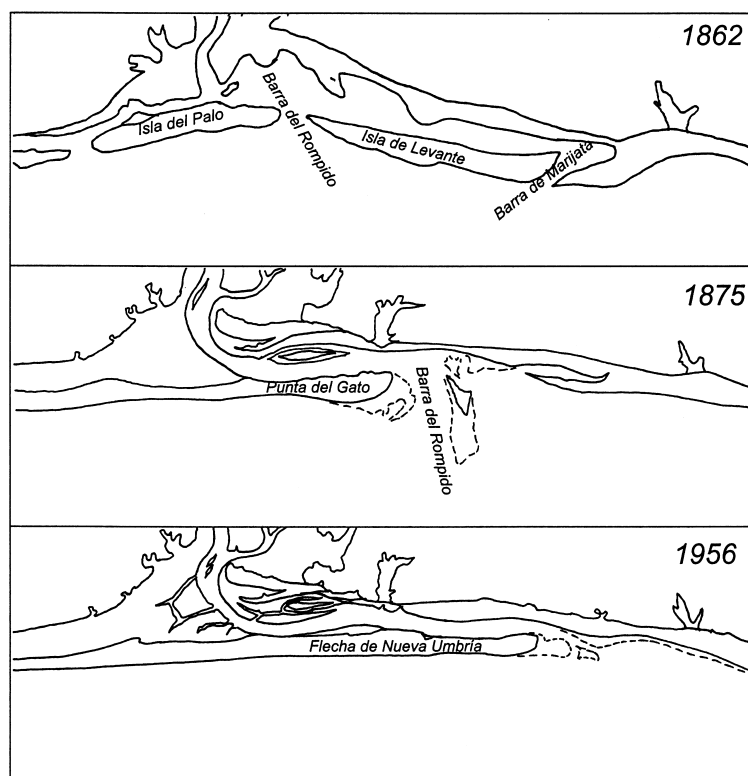


Figura 2.2: Evolución histórica del estuario del río Piedras desde sistemas de islas barrera a flecha [Fuente: Morales et al. (2001)].

#### 2.2.1.1. Tasa de avance de la flecha - efecto de las actuaciones antrópicas

Los valores de avance en el extremo de la flecha no han sido constantes, sino que en los últimos años se ha producido una variación importante en el ritmo de crecimiento natural de la flecha del Rompido. Esencialmente estos cambios en el ratio de crecimiento se consideran que son consecuencia de las actuaciones antrópicas que se han producido en el litoral onubense, y que han implicado una reducción del volumen de arena disponible, alterando el equilibrio y las tendencias naturales de las formaciones litorales. De acuerdo a Borrego et al. (1992), las actuaciones antrópicas que posiblemente hayan tenido influencia se plasman en la tabla 2.1.

En el periodo 1875 - 1956 el modelo de crecimiento es natural, ya que durante este no se pone en funcionamiento ninguna construcción importante que afectara a la dinámica sedimentaria. El crecimiento en este intervalo es de aproximadamente 30 metros por año, tasa que prácticamente se mantiene hasta aproximadamente el año 1973 con una velocidad de desarrollo de 32 metros por año.

Posteriormente, como consecuencia de la puesta en funcionamiento de la presa del Piedras en 1968, aunque la finalidad de esta era principalmente la regulación del caudal del río, tuvo también gran repercusión en la laminación de avenidas, reduciendo notablemente el caudal que llegaba a la desembocadura y eliminando el efecto de estas avenidas. Por tanto, durante el periodo 1973 - 1980 se aprecia un notable incremento en la velocidad de crecimiento de la flecha, con una tasa media 60 metros por año.

Sin embargo, en el periodo 1980-1984 se detecta una disminución de las tasas de crecimiento, reduciéndose a 40 metros por año. Esta desaceleración puede explicarse teniendo en cuenta el enorme desequilibrio dinámico en el tránsito sedimentario y la creación de una zona de sedimentación activa en la cara externa del dique de entrada del Puerto de Huelva, tras la finalización de sus obras en 1979 (Borrego et al., 1992).

Cuando se consigue de nuevo una situación de equilibrio en dicho dique, este periodo de descenso termina y se alcanza de nuevo una tasa de 63 metros por año para el periodo 1984-1987, favorecido también por el efecto que significa la proliferación de actividades relacionadas con la creación de viveros y piscifactorías dentro del estuario del río Piedras, implicando una disminución de la zona de encharcamiento mareal y, por lo tanto, el prisma de marea en el interior del estuario también disminuye. Según artículos posteriores como Morales et al. (2001), en el año 1993 de nuevo la tasa de crecimiento disminuyó a 30 metros por año.

Año	Crecimiento (m/años)	Obras civiles
1873	— 30	
1956	— 32	Presa del Piedras (1968)
1973	— 60	Isla Cristina (1974) Punta Santo Antonio (1977) Dique Puerto Huelva (1979)
1980	— 40	
1984	— 63	Piscifactorias y viveros (1982/1985)
1987	— 63	Presa de los Machos (1987)
1993	— 30	

Tabla 2.1: Tasa de crecimiento de la flecha y actuaciones antrópicas.

Como complemento a los datos anteriores, otras fuentes de información como HIDTMA (2000) describen que el desplazamiento incesante hacia el este de la salida del río alcanzó un punto de inflexión a finales de la década de los 70, a partir del momento en que el canal de entrada empezó a verse constreñido entre la barra arenosa y el encauzamiento. Como consecuencia, el flujo sedimentario del este, que se invertía fundamentalmente en el crecimiento de la flecha emergida, pasó a alimentar un sistema de

bajos frente a la salida del río. Estos han crecido de manera extraordinaria con un ritmo de avance superior al histórico que sufría antiguamente la flecha, ya que, el avance de los bajos requiere menos arena que el avance de una flecha emergida.

Al contrario, en otro estudio (CEDEX, 2013), simplemente comparando dos fotografías de los años 2004 y 2011, concluyen que el crecimiento de la flecha del Rompido ha tocado a su fin y que la propia flecha pasaría a ser un cordón litoral apoyado en el saliente actual, con una o dos golas de salida. Sin embargo, la información sobre la que se apoya esta afirmación no es suficiente para determinar si la flecha ha dejado de crecer, ya que las dos fotos que se comparan son de instantes en los que la marea se encuentra en estados diferentes y, aunque el crecimiento de la parte de la flecha emergida haya cesado, la parte sumergida se caracteriza por una importante dinámica sedimentaria.

### 2.2.2. Otros cambios más recientes

No obstante, no se han producido únicamente cambios en la extensión longitudinal de la flecha, sino que la apertura del ángulo y su anchura también han variado (García y Cáceres, 2012).

Como se puede observar en la figura 2.3, como resultado de la tendencia a guardar una posición paralela a la costa, la flecha se ha ido abriendo progresivamente desde N 80° E en 1956 a 96° en 2008, sufriendo un desplazamiento hacia el SW. Este comportamiento se justifica puesto que durante esos años cada vez el extremo de la flecha se extendía más y se acercaba al siguiente fenómeno costero, la flecha de Punta Umbría, que se extiende en dirección SW.

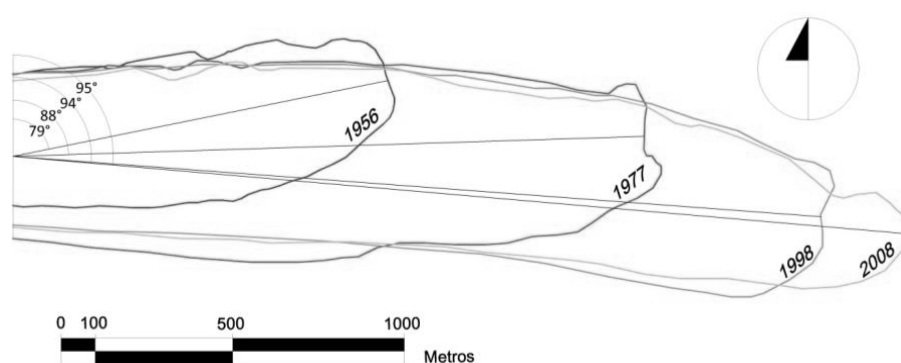


Figura 2.3: Esquema de la apertura del ángulo de la flecha [Fuente: García y Cáceres (2012)].

Finalmente, la flecha presenta una evolución más reciente hacia una disminución en su anchura. Aunque si bien en un primer momento creció en su eje central desde 437 m en 1956 hasta 571 m de anchura en 1977, descendió posteriormente hasta 507 m en 1998 y a 467 m en 2008. Especialmente importante fue el retroceso visto en el periodo 1977–1998, algo lógico teniendo en cuenta que se corresponde con la época en la que comenzaron a funcionar la mayoría de las actuaciones antrópicas realizadas en la costa de Huelva.

Conforme al estudio de HIDTMA (2000), la intensa dinámica sedimentaria que sufren los bajos de la desembocadura, sometidos a corrientes de marea intensas y a oleajes exteriores elevados, provoca variaciones sensibles en la distribución de sus canales de acceso, tal y como refleja la serie fotográfica de la figura 2.4.

### 2.2.3. Evolución cíclica de los bajos de la flecha del Rompido

En el año 2001 se publicó un estudio de la evolución del sistema (Morales et al., 2001) resultando un modelo de evolución cíclica de una duración aproximada de 12 años resumido en tres estadios (Figura 2.5):

- **Fase inicial:** existencia de dos canales principales de reflujo, uno situado hacia poniente y colocado al borde de la flecha litoral y el segundo hacia levante, separado del primero por una amplia plataforma de batida. Ambos deltas presentan sus canales principales de reflujo orientados en dirección N-S y con una curvatura hacia poniente.
- **Fase intermedia:** migración de los canales de reflujo hacia el este, acelerándose el proceso en los ciclos de marea viva, incrementando la erosión en los márgenes de levante. Durante la migración el canal situado a poniente es hidrodinámicamente más eficaz y migra más rápido que el canal de levante, lo que origina el desarrollo de una amplia plataforma de batida entre este canal y el extremo de la flecha litoral mientras que disminuye la extensión de la plataforma situada entre los dos canales de reflujo.
- **Fase final:** la migración de un canal de reflujo sobre el otro puede dar lugar a dos situaciones diferentes. La primera posibilidad es que se origine una convergencia progresiva entre ambos y finalmente una captura. La segunda posibilidad es que el canal de levante pierda funcionalidad y se convierta en un canal secundario de flujo pegándose a la Playa de La Bota y perdiendo calado. Cualquiera de estos hechos lleva al sistema a una situación en la que se presenta un solo canal de reflujo y una amplia plataforma de batida entre este y el extremo de la flecha. Este único canal debe soportar el drenaje total del prisma de marea. Esta situación suele ser inestable y en condiciones de marea viva o mareas meteorológicas, su capacidad de drenaje puede ser insuficiente, entonces, las corrientes de reflujo rompen la plataforma de batida o profundizan el canal secundario de flujo de poniente, originándose, de nuevo un sistema de dos canales de reflujo principales y comenzando de nuevo un ciclo de migración.

Conforme a Tecnoambiente (2009), entre 1980 y 1991 sucedió uno de estos ciclos completos, iniciándose un nuevo ciclo en 1994 con la apertura de un nuevo canal de poniente. Este ciclo duró hasta 2004, año en el que el antiguo canal de levante perdió completamente su funcionalidad convirtiéndose en un estrecho y somero canal secundario y apareciendo la plataforma de batida de levante casi adosada a la playa de la Bota.

La apertura de los dos canales produce una división de flujo de vaciado entre las dos salidas de modo que disminuye el prisma de marea en ambos canales tendiéndose al



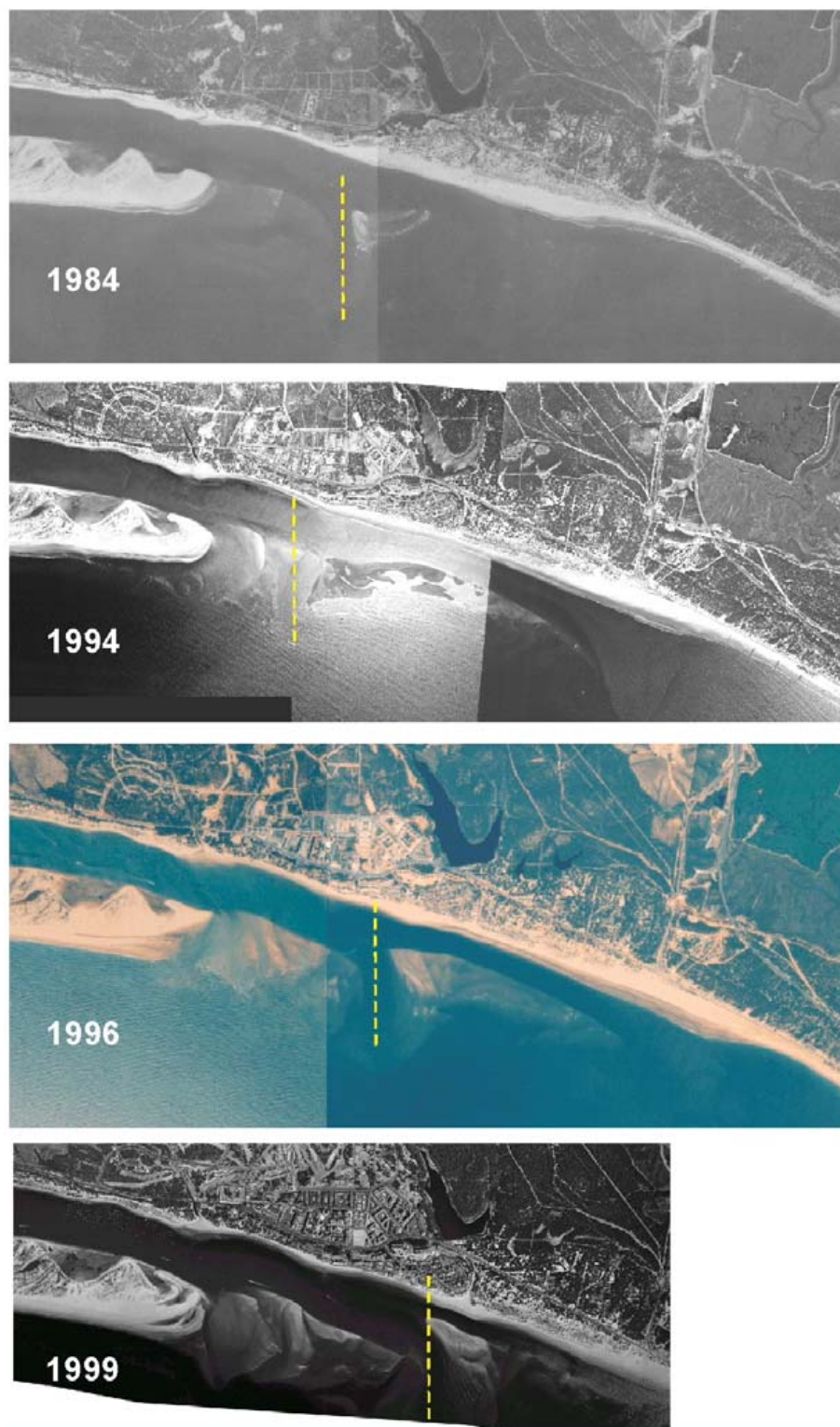


Figura 2.4: Serie fotográfica de los bajos de la desembocadura del río Piedras (1984-1999) [Fuente: HIDT-MA (2000)].

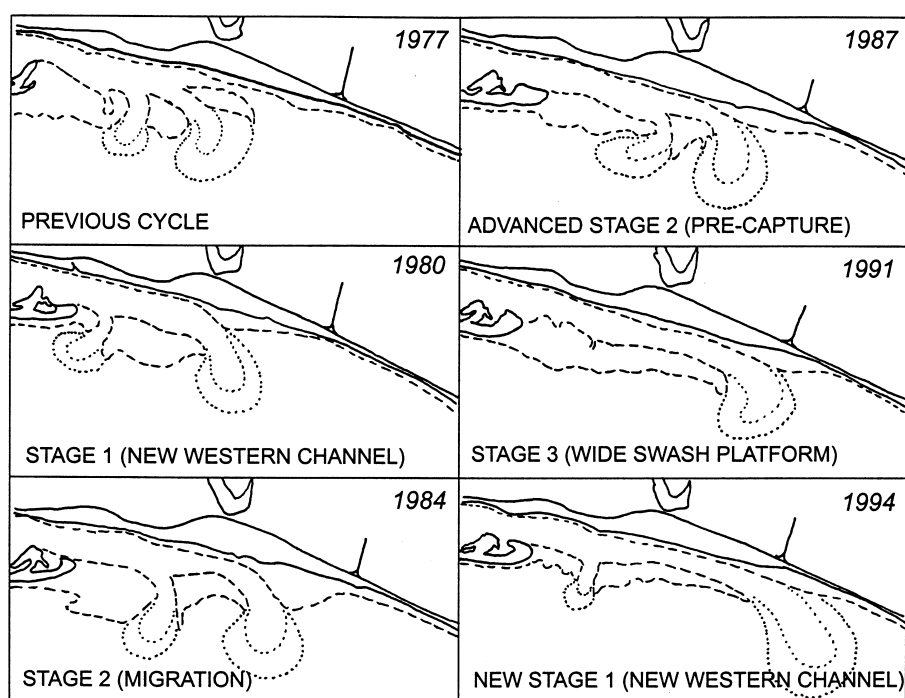


Figura 2.5: Modelo de evolución cíclica del sistema de deltas de reflujo asociados a la desembocadura del río Piedras [Fuente: Morales et al. (2001)].

aterramiento y pérdida de calado. En la situación de un solo canal el sistema tiende a la apertura de una nueva salida a poniente de aquel modo que el equilibrio entre ambos escenarios es inestable y variante. Es por ello que resulta necesario llevar a cabo operaciones periódicas de dragado a fin de mantener la navegabilidad del sistema.

Asociado con la evolución de los canales, CEDEX (2013) concluyen que el estuario del Piedras tiene una elevada capacidad de respuesta para contrarrestar posibles acumulaciones de arena en su entrada y se considera estable la actual estructura formada por el estuario, su desembocadura y la dinámica sedimentaria exterior. Cualquier acumulación accidental de sedimento en el canal de entrada provoca un rápido incremento de las corrientes, que tienden así a restablecer de forma natural el calado antiguo.

#### 2.2.4. Transporte litoral y profundidad de cierre

Sobre la playa exterior de la flecha del Rompido, el transporte litoral es de  $390,000 \text{ m}^3/\text{año}$  aproximadamente, mientras que en la playa de La Bota, localizada al este de la flecha, este valor se reduce a  $50\text{--}150,000 \text{ m}^3/\text{año}$  (HIDTMA, 2000). En este estudio se han realizado cálculos comparando diversas batimetrías demostrando que la sedimentación media en la desembocadura entre 1942 y 1981 fue de unos  $270,000 \text{ m}^3/\text{año}$ , valor que coincide bastante bien con la diferencia entre las tasas anteriores de diferencia de transporte entre la flecha y la bota. Esta tasa anual de sedimentación se mantiene de forma aproximada hoy en día. En la figura 2.6 se representa un esquema de este balance de sedimentos.

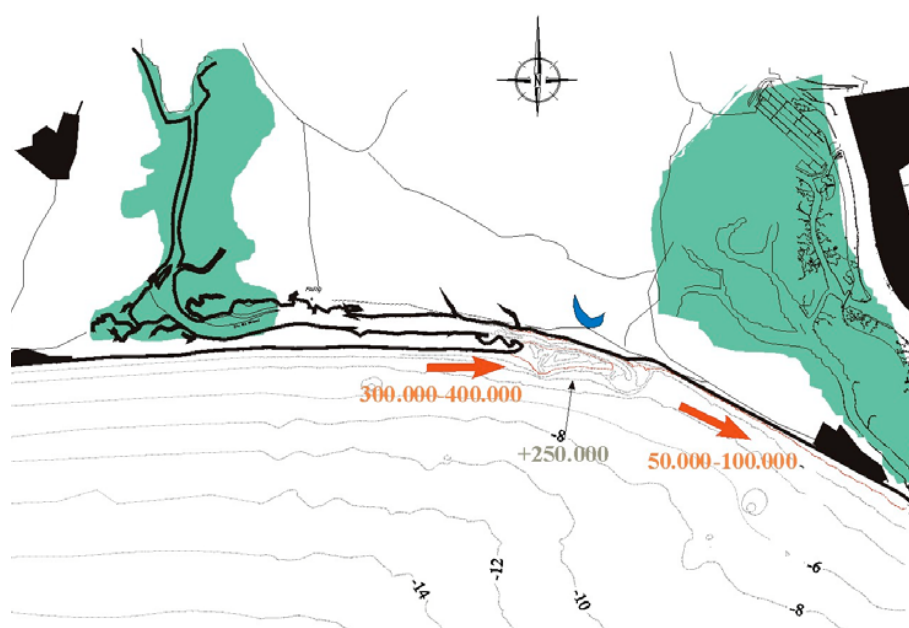


Figura 2.6: Balance de sedimentos en la desembocadura del río Piedras [Fuente: HIDTMA (2000)].

La profundidad de cierre se define como la profundidad a partir de la cual los perfiles de playa no varían con el tiempo (Dean y Dalrymple, 2001). Más allá de esta profundidad, aunque el oleaje puede mover sedimentos, el transporte neto de sedimentos no da lugar a cambios significativos en la profundidad.

La formulación comúnmente empleada para calcular la profundidad de cierre  $h_c$  es la de Birkemeier (1985):

$$h_c = 1,75H_e - 57,9\left(\frac{H_e^2}{gT_e^2}\right) \quad (2.1)$$

donde  $H_e$  es la altura de ola “efectiva”, es decir, la altura de ola significativa con probabilidad de excedencia de 12 horas al año, y  $T_e$  es el periodo significativo. Una buena aproximación para calcular la profundidad de cierre es simplemente  $h_c = 1,57H_e$ .

Sin embargo, CEDEX (2013) caracterizan la profundidad de cierre en la playa del Rompido a partir de su definición conceptual y no de la formulación. Para su determinación se han comparado tres batimetrías (levantadas en los años 1870, 1983 y 2004) concluyendo con una estimación de la profundidad de cierre a gran escala, o largo término, de aproximadamente 11 m, correspondiente al primer cruce de las tres batimetrías empleadas (Figura 2.7).

### 2.2.5. Aportes sólidos del río

El río Piedras ha sido objeto de regulación progresiva desde el año 1968, fecha en la que se terminó la construcción del embalse del Piedras, con el objeto de aprovechar al máximo los recursos hidráulicos de una zona muy seca. Posteriormente se completó el

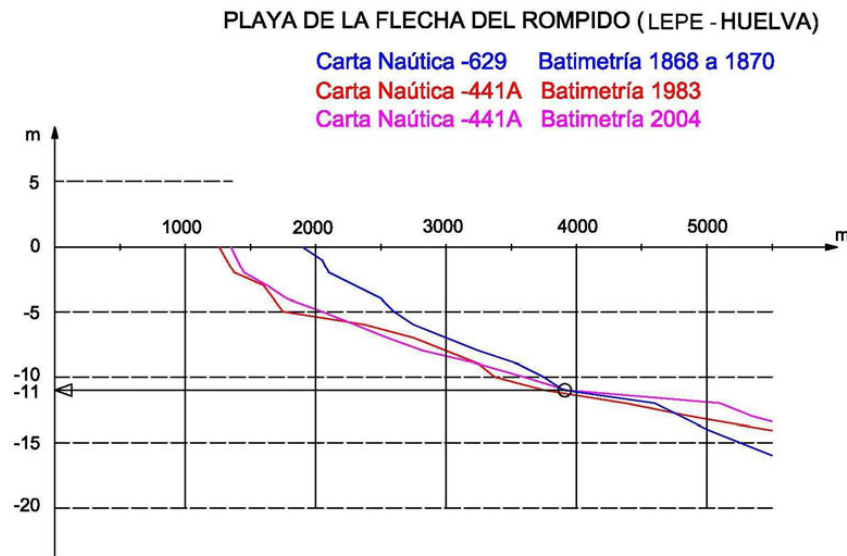


Figura 2.7: Detalle del perfil de playa de la Flecha del Rompido para caracterizar la profundidad de cierre a gran escala [Fuente: CEDEX (2013)].

corte de los aportes del río al estuario con la construcción del embalse de Los Machos en 1987, aguas abajo del anterior y que se encuentra justo en el límite de la influencia de las mareas (24 km aguas arriba desde la desembocadura) (Morales et al., 2001). Con estas obras, la superficie total de la cuenca pasó de una extensión de  $531 \text{ km}^2$  a una superficie de  $257 \text{ km}^2$ . La superficie captada por el embalse del Piedras fue de  $196 \text{ km}^2$ , y la del embalse de los Machos de  $78 \text{ km}^2$  (HIDTMA, 2000).

En otro estudio realizado sobre la flecha del Rompido en 1995 por HIDTMA, se utilizó un modelo hidrodinámico para analizar los caudales aportados por la cuenca al río. Como resultado del modelo se obtuvo que los caudales medios anuales (1968-1994) producían en toda la cuenca unos aportes de  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ , de los cuales alcanzan el estuario solo  $24 \text{ m}^3/\text{s}$  y, en cuanto a los caudales máximos, la aportación de la cuenca para un periodo de retorno de 10 años puede llegar a  $405 \text{ m}^3/\text{s}$ , quedando de toda esta cantidad únicamente  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  como aporte neto al estuarios en el tramo de cuenca libre de regulación.

Estos valores presentan una cuenca de escasa importancia a los efectos de sus aportes medios y máximos al estuario. La construcción del primer embalse del río Piedras en 1968 supuso el cese de los aportes de la cuenca hacia el estuario del río y, en la actualidad, la gran escasez de agua en el sistema Piedras-Chanza hace que ni tan siquiera se haya mantenido desde entonces un mínimo caudal ecológico en el río. Por tanto, según HIDTMA (2000), los aportes sólidos actuales del río Piedras a la costa se pueden considerar nulos.

## 2.3. Importancia sociocultural

El conjunto de la flecha constituye un enclave de enorme valor paisajístico y ambiental, siendo único en todo el litoral andaluz, tanto por sus dimensiones (más de 10 km de longitud y entre 350-750 m de anchura) como por su geodinámica y geomorfología peculiares. Estas características unidas a la riqueza de su flora y fauna llevaron al conjunto (2.530 ha) a ser declarado Paraje Natural (Figura 2.8) mediante la Ley 2/1989, de 18 de julio, por la que se aprueba el inventario de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía, también es Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA) desde el año 2002 y se encuentra propuesto como Lugar de Interés Comunitario (LIC). Sin embargo, hay que destacar los cambios en los usos del suelo provocados por la intensa ocupación antrópica, fundamentalmente con fines turísticos, de este tramo del litoral.

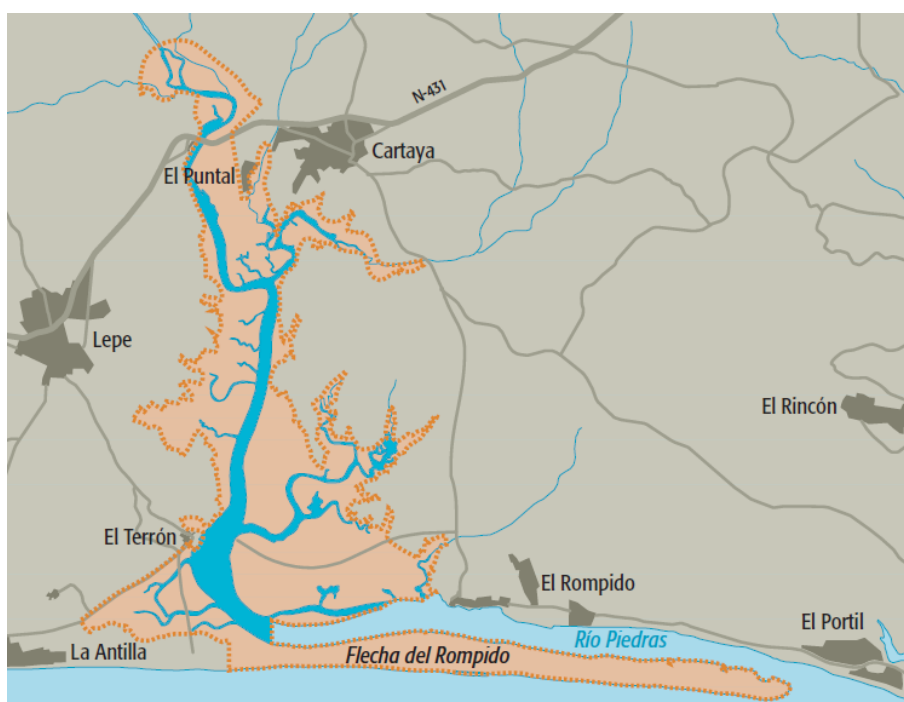


Figura 2.8: Delimitación del Paraje Natural Marismas del Río Piedras y Flecha del Rompido [Fuente: J.A (2001)].

El Rompido es una localidad costera en la que la actividad marinera y pesquera han sido la base de la economía local hasta la década de los 80, en que comienza una etapa de transición hacia una economía enfocada al turismo. Sin embargo, el sector pesquero sigue siendo muy influyente y no se tiene intención de perder. Desde este punto de vista, el Ayuntamiento de Cartaya ha trabajado actualmente desde varios frentes con el objetivo de impulsar y promover el desarrollo de los sectores pesqueros y acuícolas de la localidad, como por ejemplo, conseguir la adhesión a la Asociación de Desarrollo Pesquero Costa de la Luz y, por otro lado, la confirmación por parte de la Junta de Andalucía, del necesario dragado del canal de acceso.

Mano a mano con el aumento notable del turismo, se encuentra el desarrollo e innovación de las instalaciones náutico deportivas de la ría del Piedras. Durante esta última



década, siguiendo el Plan de Usos de los Espacios Portuarios de dicha ría, la mayoría de los tradicionales fondeos que ocupaban la ría han sido sustituidos por marinas con atraques en pantalán, existiendo actualmente cinco clubes náuticos en El Rompido y El Terrón que, en conjunto, engloban entre 2000 y 2500 embarcaciones en toda la ría (Figura 2.9).



Figura 2.9: Áreas de atraque en el río Piedras [Fuente: J.A (2009)].

Por tanto, como medida para un eficiente desarrollo de los sectores pesquero y turístico y, en general, de la economía de El Rompido y El Terrón, es imprescindible que las condiciones de navegabilidad en todo el río sean adecuadas. Sin embargo, la desembocadura del río ha experimentado durante los últimos años un desarrollo que desencadena en que, con baja actividad de flujo de agua, las canales de acceso al río tiendan a sedimentar material disminuyendo los calados, lo que origina que una parte significativa de la flota rompiera tenga actualmente problemas de navegabilidad en el acceso al río Piedras.

En el Plan de Usos de los Espacios Portuarios de la Ría del Piedras (J.A, 2009) aparece descrita la consideración de garantizar un canal de acceso a través de la barra de la ría con un calado mínimo en torno a 1,5 metros. Además se definió que, a tal efecto, se debían desarrollar las actuaciones que fueran necesarias, siempre que se asegure su sostenibilidad, y se realizara un registro sistemático de los calados disponibles en el canal de acceso por la barra difundiendo dicha información a los usuarios.

Este problema se ha convertido en una preocupación para los locales de los municipios desencadenando que se hayan realizado multitud de estudios relacionados con la tendencia a evolucionar del extremo de la flecha y sus bajos. Por supuesto, también se han presentado multitud de propuestas, más o menos agresivas, como la proposición de romper la flecha para crear un acceso directo del puerto pesquero al mar (CEDEX, 2013). Tras analizar muchos de estos estudios se concluye que la única propuesta viable es realizar un dragado de las canales de acceso al río en la desembocadura regularmente, cada cierto número de años. Por otra parte, la Junta de Andalucía pretende revisar el

Plan de Usos de los Espacios Portuarios de la Ría del Piedras para adaptarlo a las nuevas circunstancias.

Además, la Agencia Andaluza de Puertos aplica un programa establecido para realizar mediciones batimétricas del canal navegable con una frecuencia mínima semestral, facilitando los datos de las batimetrías, así como la posición actualizada de las boyas, a través de la página web de dicha Agencia.

Mencionar que en el año 2000, encargado por el Ministerio de Medio Ambiente, se elaboró el estudio HIDTMA (2000), en el que se concluye, tras analizar toda la costa onubense, que en la zona de la flecha del Rompido no era posible ninguna actuación razonable que pudiera suponer una mejora permanente de los calados de las canales de acceso y todas las posibles actuaciones tendrían impactos negativos muy elevados en la costa. Por tanto, se concluía la inutilidad de pretender abordar la navegabilidad de la entrada al río Piedras y que el desarrollo futuro de la zona había de planificarse atendiendo a esta realidad física.

## **2.4. Actuaciones de dragado**

Como se ha argumentado anteriormente, el dragado de la canal de acceso a la ría del Piedras es necesario regularmente y supone una repercusión muy importante en el desarrollo del ámbito de la náutica de recreo y del sector pesquero.

### **2.4.1. Dragado anterior (2009 - 2010)**

Como consecuencia, en el periodo 2009 – 2010 se dragó la canal de acceso de poniente formando un canal de anchura aproximada 32 metros y una longitud de 1,3 kilómetros (Landeró, 2010), suponiendo la extracción de cerca de 200,000  $m^3$  de arena, que fueron depositadas en su mayor parte en las playas de Nuevo Portil, así como la regeneración de los arenales del Paraje Natural de los Enebrales. Cuando finalizaron dichas labores de dragado del canal, este se desplazó hacia levante a un ritmo de 29.6 metros por mes, variando así su ubicación y dificultando el balizamiento del mismo (Ponce, 2011).

Esta actuación no fue realizada correctamente, pues teniendo un plazo previsto de dos meses, este se alargó a dos años. De acuerdo a varias fuentes como Landeró (2012), la causa principal de este retraso fue la adjudicación a una empresa sin experiencia ni medios propios, lo que propició continuos fracasos técnicos y cambios de dragas sin conseguir el resultado previsto. Finalmente se abrió un canal de forma muy extraña, con forma de “S” invertida, y prácticamente innavegable con marea baja.

Poco tiempo después de este dragado, los usuarios no estaban satisfechos con la actuación pues consideraban que el calado seguía siendo insuficiente unido a la incorrecta posición de las balizas que lo señalaban (Landeró, 2013). La respuesta de la Junta de Andalucía y otros expertos en la materia fue que no se preveía la realización de nuevas labores de dragado o mantenimiento, ya que, después de este, aunque con cierto retraso, el canal se había enderezado, estabilizado y hecho más ancho y profundo como consecuencia de la propia dinámica de las mareas.

Sin embargo, en julio de 2014 la Capitanía Marítima de Huelva, como organismo competente en materia de seguridad en la navegación, informó en un aviso de seguridad a navegantes, que el tráfico marítimo en su canal de acceso “*queda restringido hasta nuevo aviso a los periodos cercanos a la pleamar*” porque de acuerdo con el último estudio batimétrico realizado por la Agencia Pública de Puertos de Andalucía (APPA) existían zonas de sonda próximas a 0.50 metros en la bajamar máxima viva equinoccial (Gómez, 2014). Un hecho que supone que es “responsabilidad exclusiva del patrón de cada embarcación el tránsito por estas aguas fuera de dichos periodos”.

#### 2.4.2. Nuevo dragado (2016)

Ante esta situación, el 14 de abril de 2016 la Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía saca a licitación el concurso público para la realización del dragado del canal de acceso a la ría del Piedras, por importe de 327,000 € (presupuesto de ejecución por contrata) (J.A, 2016).

Según varias fuente como Costa (2016), la tramitación se realiza por vía de urgencia a fin de acortar los plazos administrativos del proceso de adjudicación y estar en disposición de acometer la obra lo antes posible, dando así respuesta a las peticiones de los usuarios de esta ría. El objetivo prioritario de la obra es mejorar las condiciones de navegación y accesibilidad de la flota de recreo y pesquera de la zona, mediante el establecimiento de una canal de navegación de 600 metros de longitud y 50 metros de anchura con una calado mínimo de un metro de profundidad en la bajamar máxima viva equinoccial, implicando que será necesario extraer unos 15,000  $m^3$  de material.

### 2.5. Clima marítimo

En esta sección se describen los principales agentes climáticos que influyen en la hidrodinámica del estuario del Río Piedras y la flecha del Rompido: oleaje, viento (ambos en régimen medio y extremal) y variaciones del nivel del mar. Se ha despreciado el efecto de los aportes fluviales del río Piedras debido a que, tras su regulación, se ha demostrado que son prácticamente nulos (HIDTMA, 2000).

#### 2.5.1. Datos de partida

En el Golfo de Cádiz se encuentra la “Boya de Golfo de Cádiz”, con disposición de gran volumen de datos y frecuencia de muestreo excelente, sin embargo, por su lejanía a la costa onubense, se ha optado por tomar los datos de un punto SIMAR más cercano. Concretamente, debido a su posición respecto a la flecha del Rompido, se han tomado del punto “SIMAR 5029023” (7.08°W 37.17°N), facilitado por Puertos del Estado (Ministerio de Fomento). El conjunto de datos de este punto contiene las estimaciones diarias de oleaje (modelo WAM) y viento (modelo HIRLAM) desde 1958.

Otra fuente de información de los datos de armónicos de marea es el mareógrafo “Huelva 5”, de la red de mareógrafos de Puertos del Estado. La elección de este mareógrafo se sustenta en ser el que se encuentra más cercano a la zona de estudio, instalado



en el Puerto Deportivo de Mazagón, en las coordenadas 37° 07' 55,27" N y 006° 50' 01,28" W.

En el análisis del clima marítimo se han estudiado, tanto para el oleaje como para el viento:

- Descripción general en profundidades indefinidas.
- Régimen medio.
- Régimen extremal o de tormenta.

Además se han analizado las variaciones del nivel del mar.

### 2.5.2. Descripción general del oleaje en profundidades indefinidas

En el Golfo de Cádiz se produce un fuerte predominio de los oleajes comprendidos en el sector SW-N, estando la zona parcialmente expuesta a las intensas borrascas de componentes N y NW. Sin embargo, la alineación general de la costa sur portuguesa hace que estos oleajes del cuarto cuadrante no tengan apenas incidencia en la costa occidental onubense, por lo que son los temporales del tercer cuadrante los que pasan a controlar de manera principal los procesos litorales en este tramo (HIDTMA, 2000).

Se han representado tanto un diagrama de la altura de ola con respecto al tiempo como de la velocidad del viento con respecto al tiempo durante todo el periodo en el que existen datos (1958-2016) (Figuras 2.10 y 2.11, respectivamente).

Para el oleaje se obtienen los diagramas de dispersión que relacionan las variables de altura de ola significativa ( $H_s$ ), periodo de pico ( $T_p$ ) y dirección media de procedencia ( $\theta$ ). Para el viento se relacionan las variables velocidad del viento ( $V_v$ ) y dirección del viento ( $\theta_v$ ). Estos diagramas permiten conocer cuáles son los tipos de oleaje y de viento más frecuentes.

Finalmente dichas variables se representan también mediante histogramas y una rosa de oleaje y viento, lo que permite apreciar de forma rápida cuales son las alturas de ola, periodos, direcciones medias de procedencia, velocidades y direcciones de viento que predominan en la zona de estudio. Todas estas gráficas y la descripción general de los forzamientos de oleaje y viento en profundidades indefinidas se presenta en el Apéndice A. A continuación, a modo de resumen y representativo del análisis realizado en este apéndice se presentan las rosas de oleaje (figura 2.12) y viento (figura 2.13), así como unas conclusiones finales.

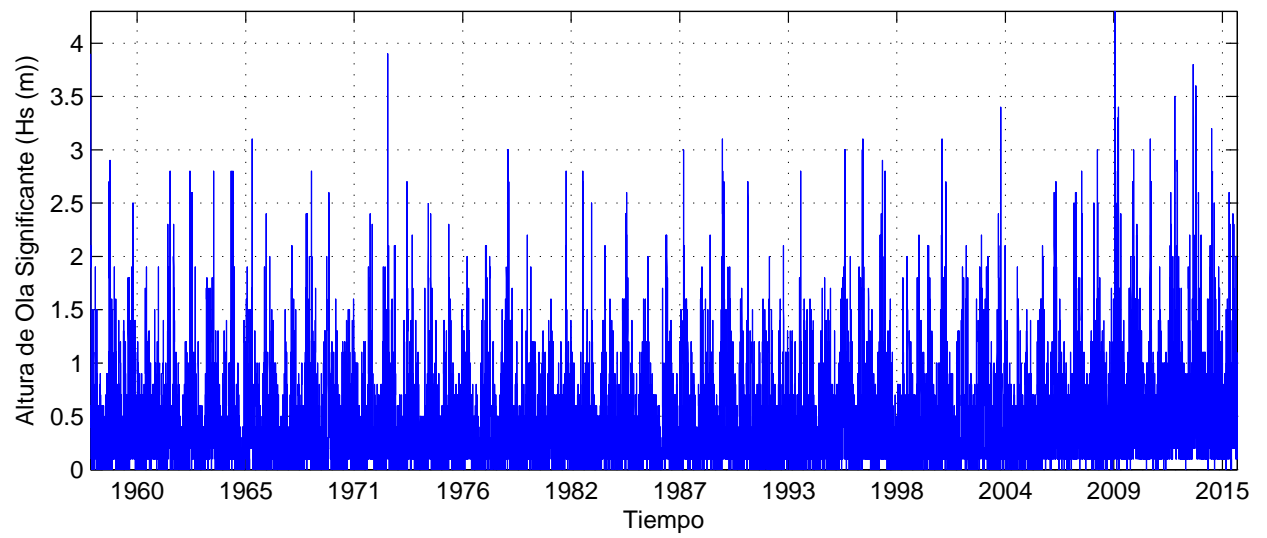


Figura 2.10: Serie temporal de altura de ola.

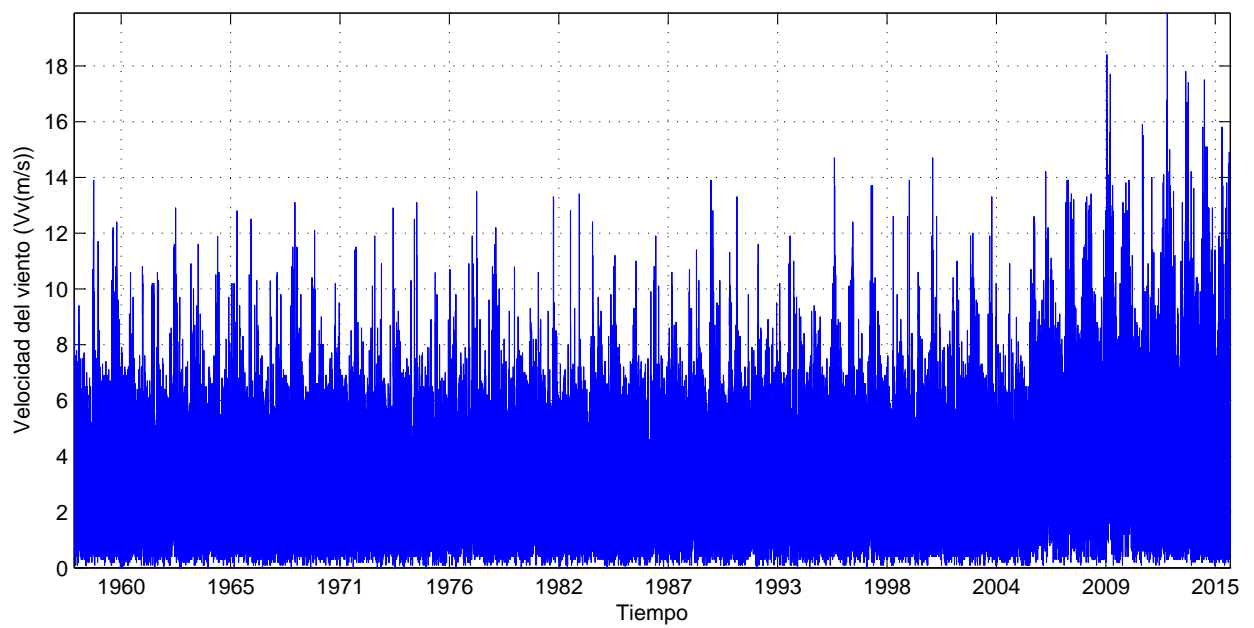


Figura 2.11: Serie temporal de velocidades de viento.

### Oleaje

Los resultados más reseñables de la descripción general del oleaje en profundidades indefinidas son:

- Rango de alturas de olas entre 0 y 4.5 m.
- Las alturas de ola más frecuentes están entre 0.1 y 0.5 m.
- Rango de periodos pico entre 2 y 21 s.
- Los periodos pico más frecuentes están entre 4 y 6 s.
- La dirección de procedencia del oleaje más frecuente es SW.

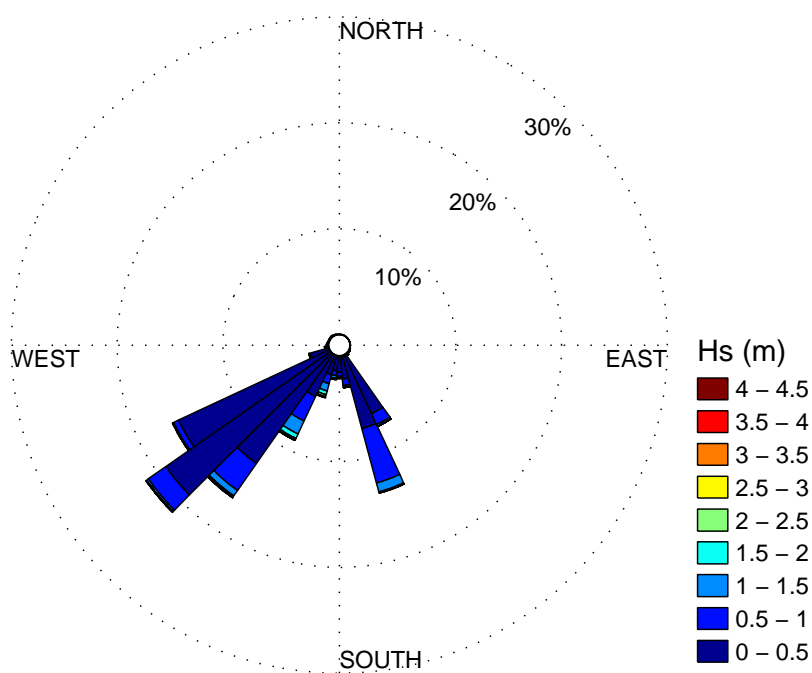


Figura 2.12: Rosa de oleaje.

### Viento

Los resultados más destacados de la descripción general del viento en profundidades indefinidas son:

- Rango de velocidades de viento entre 0 y 20 m/s.
- Las velocidades de viento más frecuentes están entre 2 y 4 m/s.
- Las direcciones de procedencia del viento más frecuentes son NNW y SW.

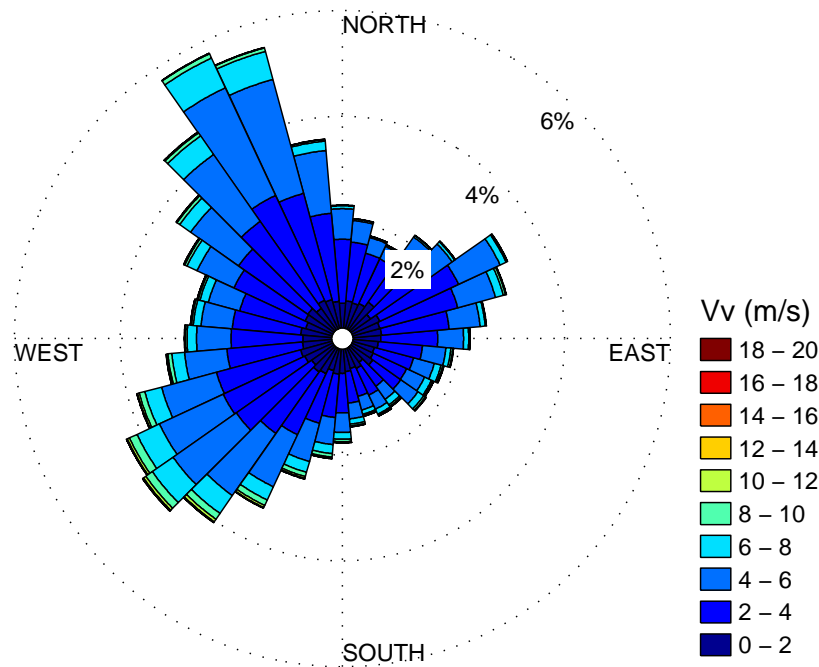


Figura 2.13: Rosa de viento.

### 2.5.3. Régimen medio

Se analiza el régimen medio del oleaje en profundidades indefinidas para la altura de ola significativa ( $H_s$ ) y de velocidades de viento ( $V_v$ ) para todas las direcciones.

El análisis del régimen medio incluye:

- Ajuste de los datos a una función de densidad de probabilidad de Weibull.
- Ajuste de los datos a una función de distribución de Weibull.
- Tabla resumen de resultados parciales.

Con dichas funciones se pretende conocer la densidad de probabilidad de las alturas de ola y velocidades de viento, así como su probabilidad de no excedencia. Estos ajustes se exponen también en el Apéndice A y, como resumen, se presentan los valores de altura de ola y velocidad de viento asociados a una probabilidad de no excedencia del 50 y 85 % tanto para oleaje (tabla 2.2) como para viento (tabla 2.3).

Prob. No excedencia	Altura de ola ( $H_s$ (m))
50 %	0.3
85 %	0.7

Tabla 2.2: Tabla resumen del régimen medio para la altura de ola.

Prob. No excedencia	Velocidad de viento ( $V_v(m/s)$ )
50 %	3.5
85 %	5.5

Tabla 2.3: Tabla resumen del régimen medio para la velocidad de viento.

#### 2.5.4. Régimen extremal

Para el análisis del régimen extremal es necesario extraer los datos de la Boya que corresponden a periodos de tormenta, para ello se emplea el método de "Picos Sobre Umbral (POT)", fijando una altura de ola umbral y velocidad de viento umbral correspondiente al valor que es superado menos del 1 % del tiempo en el año medio. Para garantizar la independencia estadística entre temporales, se ha supuesto que la duración entre temporales debe ser superior a 48 h.

En cada análisis se obtiene un número de eventos extremos para los cuales se analiza:

- Ajuste de los datos a una función de densidad de probabilidad generalizada de valores extremos. La ventaja de emplear dicha función es que dependiendo del valor que tomen los parámetros de la función, automáticamente se convierte en una Gumbel, Frechet o Weibull.
- Ajuste de los datos a una función de distribución generalizada de valores extremos.
- Tabla resumen de resultados parciales.

##### Oleaje

Para la obtención del régimen extremal de altura de ola se ha fijado la altura de ola umbral en 1.5 m. Con este valor umbral se han obtenido 538 eventos extremos en los 57 años meteorológicos analizados.

Teniendo en cuenta únicamente las alturas de ola producidas en estos 538 eventos extremos, se obtiene los siguientes valores de altura de ola asociados a probabilidad de no excedencia de un 50 y 85 %.

Prob. No excedencia	Altura de ola ( $H_s(m)$ )
50 %	1.7
85 %	2.5

Tabla 2.4: Tabla resumen del régimen extremal para la altura de ola.

##### Viento

En el caso de viento, se ha fijado la velocidad de viento umbral en 8.5 m/s y se han obtenido 1283 eventos extremos en los 57 años meteorológicos analizados.

Prob. No excedencia	Velocidad de viento (Vv(m/s))
50 %	9.5
85 %	12

Tabla 2.5: Tabla resumen del régimen extremal para la velocidad de viento.

### 2.5.5. Variaciones del nivel del mar

La hidrodinámica de zonas costeras y estuarinas está fuertemente influenciada por las variaciones del nivel del mar que se producen a distintas escalas temporales (Dean y Dalrymple, 2001). De acuerdo con Dean y Dalrymple (2001), uno de los procesos geológicos que más importancia tienen a largo plazo en la costa es la variación relativa del nivel del mar, que puede producirse como resultado de un cambio en el volumen de agua de los océanos o el hundimiento o afloramiento del terreno por procesos geológicos. En este caso, las variaciones del nivel del mar a largo plazo se han despreciado debido a la escala temporal del estudio. Además de los mecanismos a largo plazo, hay otros forzamientos a corto plazo, que son los efectos de las tormentas, oleaje, corrientes y viento. Estos últimos actúan comúnmente en periodos de segundos, horas y días, más que periodos de años o décadas.

Los cambios del nivel del mar debido a forzamientos a largo plazo pueden tener variaciones de milímetros al año, mientras que los cambios de nivel causados por las mareas astronómicas pueden llegar a ser del orden de metros por hora, por las tormentas también de metros por hora, y por el oleaje de metros por segundo (Dean y Dalrymple, 2001). Por otro lado, el nivel de marea se puede definir como el nivel del mar sin tener en cuenta la acción del paso de olas individuales, y resultado de considerar la marea astronómica y la marea meteorológica.

#### 2.5.5.1. Marea astronómica

La marea astronómica es de carácter determinista y se define como la oscilación periódica del nivel del mar inducida por fuerzas gravitacionales que actúan sobre las partículas de agua en la superficie de la Tierra. Es un fenómeno periódico muy complejo pero predecible, con distintas frecuencias según la componente de marea que se estudie. Es el resultado de la combinación de cuatro fuerzas actuantes:

- Gravedad de la tierra.
- Gravedad de la luna.
- Gravedad del sol.
- Fuerza centrífuga de rotación del sistema tierra-luna.

Los componentes de marea reflejados en la tabla 2.6 son dato del mareógrafo “Huelva 5” de Puertos del Estado. Estos son los más significantes y son los que se han impuesto como condiciones de contorno abiertas en el modelo del tipo de nivel con forzamiento astronómico.

Armónico	Amplitud (cm)	Fase (°)
M2	104.27	56.93
S2	37.39	83.70
N2	22.16	41.04
K2	10.63	81.67
K1	6.60	48.95
SSA	6.51	90.40
O1	5.96	311.45
NU2	4.12	45.74
MU2	4.06	20.95

Tabla 2.6: Armónicos de marea (Huelva 5).

Los armónicos de marea más significantes en la zona de estudio son M2 y S2, por tanto, la marea es semidiurna, ya que:

$$\frac{\eta_{K1} + \eta_{O1}}{\eta_{M2} + \eta_{S2}} \approx 0,09 \quad (2.2)$$

#### 2.5.5.2. Marea meteorológica

La marea meteorológica es de tipo aleatorio y se define como la oscilación del nivel del mar inducida por la acción de gradientes de presión atmosférica (marea barotrópica), por la tensión tangencial del viento sobre la superficie de agua o por la sobreelevación producida por el oleaje en la zona de rompientes (setup). En este estudio se ha despreciado la componente resultante de la acción de gradientes de presión atmosférica, debido a la escala espacial del mismo y la complejidad que supone incorporarla al modelo numérico.





---

## Capítulo 3

# Metodología

---

En este capítulo se expone la metodología seguida en este Trabajo Fin de Máster para la consecución de los objetivos marcados. El contexto de este proyecto es docente y no cuenta con financiación propia, por lo que ha sido imprescindible la búsqueda y el empleo de datos de otros proyectos y profesionales.

### 3.1. Escenarios batimétricos

Como se ha definido anteriormente en el Capítulo 1, los objetivos principales de este trabajo son caracterizar la hidrodinámica de la zona de estudio y estudiar la influencia que tiene una obra de dragado en la desembocadura del río en la hidrodinámica de la zona. Para conseguir estas metas es necesario definir dos escenarios, uno para cada uno de los objetivos que se pretenden alcanzar.

Ambos escenarios son escenarios batimétricos representativos de la topografía y la batimetría de la zona a modelar. El primero de ellos representará la situación de partida, sobre la que se simularán las condiciones de forzamiento y se describirán las características hidrodinámicas de la zona de estudio. En el segundo de ellos la batimetría de partida se modificará incluyendo en la desembocadura el canal resultado de la obra de dragado que se plantea llevar a cabo en julio de 2016, con el objeto de analizar las posibles afecciones que conllevan en la hidrodinámica de la zona.

Aunque la única diferencia entre ambos escenarios se encuentra en la batimetría de la desembocadura del río, el canal de dragado, se analizará la influencia que puede tener en la hidrodinámica de todo el estuario.

#### 3.1.1. Escenario 1: Situación de partida

Para la definición de la batimetría representativa de la situación de partida se ha empleado:

- Batimetría completa de la zona de estudio facilitada por el Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales del Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía de la Universidad de Granada.
- Batimetría más precisa de la zona de la desembocadura y zona mojada del río, facilitada por Juan Antonio Morales González, miembro del grupo de Investigación de Geología Costera y Recursos Hídricos de la Universidad de Huelva.

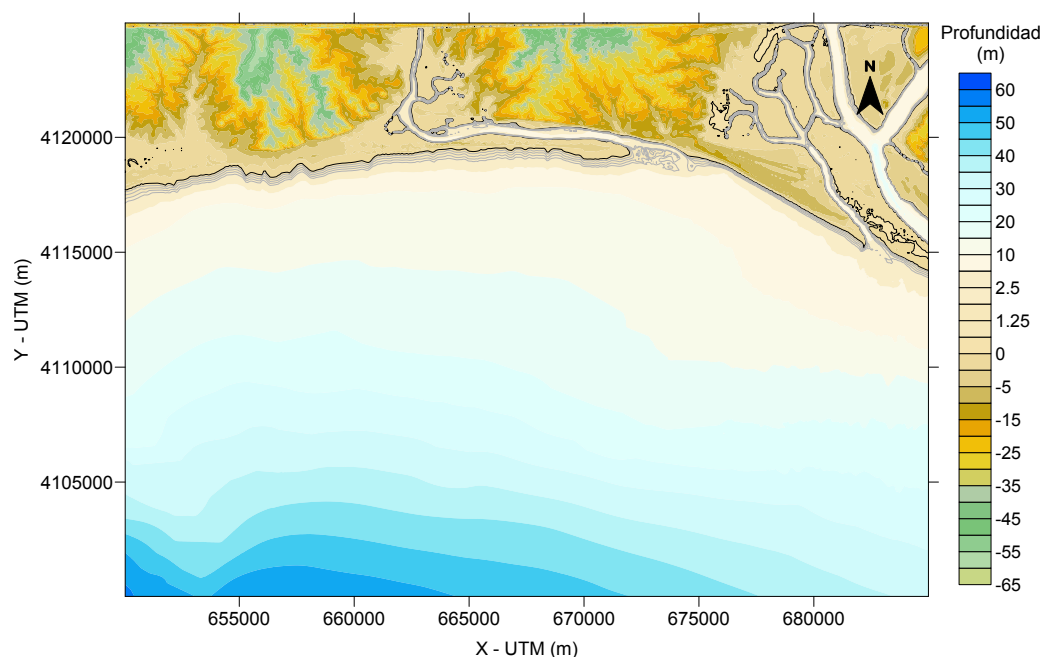


Figura 3.1: Batimetría de la situación de partida.

Este escenario refleja la situación de partida de la zona de estudio, sin tener en cuenta la obra de dragado de la canal principal de acceso al río. En el apartado 3.3.3 se detalla el procedimiento seguido para la obtención del archivo de batimetría. Es importante destacar que, siendo consciente de nuestras limitaciones presupuestarias, la batimetría proporcionada por Juan Antonio Morales de la desembocadura del río es del año 2010 y esta se supondrá la situación de partida, pues no ha sido posible conseguir batimetrías más recientes con precisión suficiente para el modelo que se pretende simular. Por supuesto, si este estudio hubiera tenido financiación se hubiera encargado el levantamiento de la batimetría de la desembocadura del río a alguna empresa.

### 3.1.2. Escenario 2: Dragado de la canal principal de acceso

En este segundo escenario se ha modificado la batimetría anterior incluyendo el resultado de dragar una canal de navegación. Para la definición de esta canal de navegación se ha analizado la definición de la canal propuesta por la Junta de Andalucía en el proyecto que sacó a licitación en Abril de 2016 (J.A, 2016):

- Calado mínimo: 1 m en la bajamar máxima viva equinocial.
- Longitud: 600 m.
- Anchura: 50 m.
- Volumen material: 15,000  $m^3$ .
- Presupuesto: 327,000 €<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Total presupuesto de ejecución por contrata.

Sin embargo, se ha considerado que el emplazamiento en planta de la obra de dragado planteada por la Junta de Andalucía (Esquema amarillo de la figura 3.2) no es la más adecuada, pues en el tramo anterior de la canal de navegación el calado es menor. Finalmente, se ha optado por caracterizar la batimetría del Escenario 2 con la obra de dragado en planta esquematizado en color rojo en la figura 3.2. Por supuesto, se ha respetado la cota de calado mínimo y se ha pretendido que las dimensiones del canal no varíen excesivamente.

- Calado mínimo: 1 m en la bajamar máxima viva equinocial.
- Longitud: 650 m.
- Anchura: 50 m.
- Volumen material:  $50,000 \text{ m}^3$ . La diferencia de volumen de material entre ambas hipótesis se justifica con que en esta última el calado es menor y ambos cálculos están realizados desde batimetrías de origen diferentes.
- Presupuesto: 715,000 €. Este incremento de volumen respecto a lo proyectado por la Junta de Andalucía supondría una inversión superior al doble de lo plasmado en su proyecto.

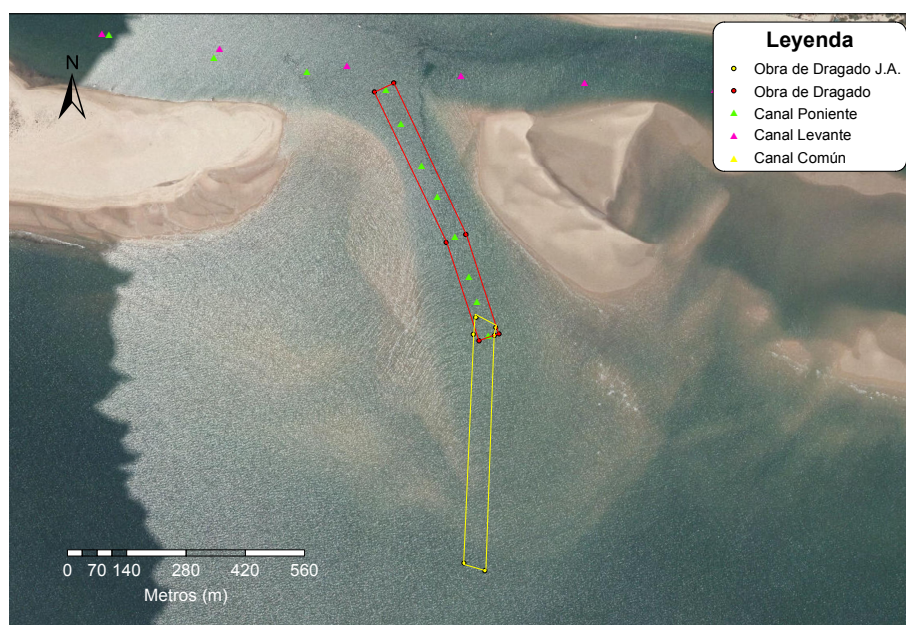


Figura 3.2: Definición de la obra de dragado.

Con la finalidad de que se perciban las diferencias entre las batimetrías de los Escenarios 1 y 2 se han creado las figuras 3.3 y 3.4. Comparando ambas figuras es fácil apreciar la obra de dragado característica del Escenario 2.

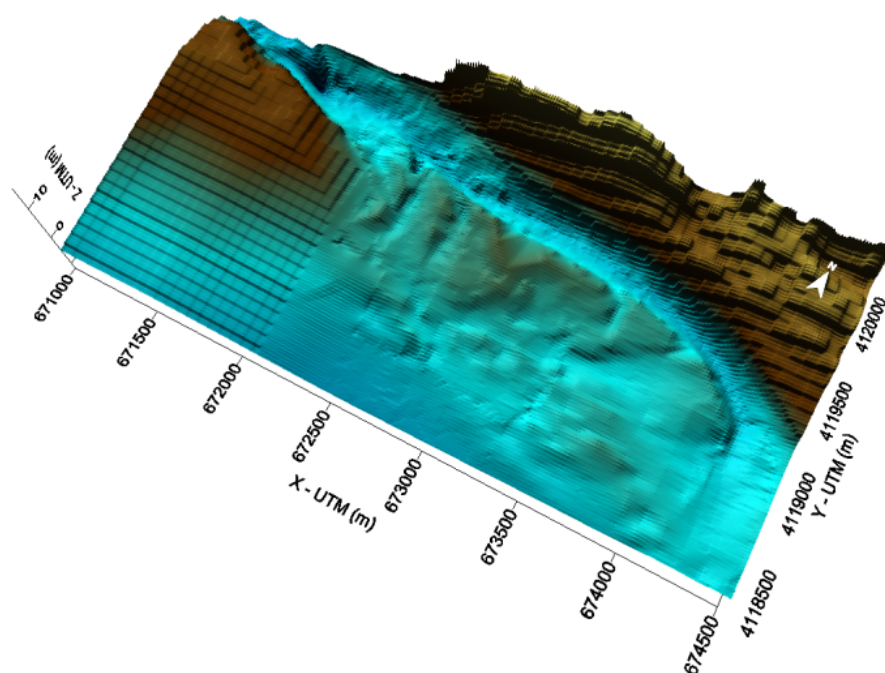


Figura 3.3: Representación 3D de la zona de la desembocadura de la batimetría del Escenario 1.

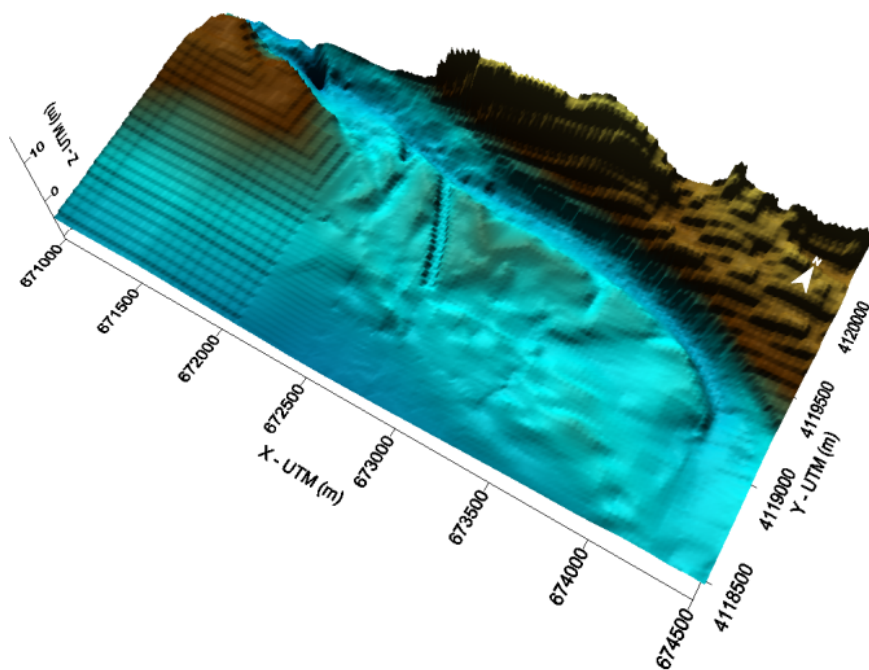


Figura 3.4: Representación 3D de la zona de la desembocadura de la batimetría del Escenario 2.

## 3.2. Descripción de las características del modelo numérico

El modelo numérico empleado para la propagación de oleaje y análisis hidrodinámico es Delft3D (<http://oss.deltares.nl/web/delft3d>).

Se ha utilizado este modelo ya que es el que mejor se adapta a las necesidades exigidas, entre ellas: la necesidad de un código que trabaje tanto en agua profundas como someras para estudiar la propagación del oleaje desde su generación hasta la costa, que tenga en cuenta los procesos físicos de disipación de energía, reflexión, refracción, interacciones no lineales, etc. y además se trata de un software libre.

El modelo Delft3D fue desarrollado por la Universidad tecnológica de Delft (TU Delft, Países Bajos) para estimar las características del oleaje en zonas costeras, estuarios, lagos, canales, islas, ... generados por los vientos locales y corrientes ambientales.

Dicho programa engloba varios módulos, empleándose en este proyecto de manera conjunta y sincronizada los módulos WAVE y FLOW, lo que dota a las simulaciones de una mayor precisión al estar considerando parámetros tanto del oleaje como hidrodinámicos.

### 3.2.1. Módulo FLOW

El módulo Delft3D-FLOW proporciona la base hidrodinámica al resto de módulos del programa, en concreto al WAVE. Permite simular el flujo y el transporte en aguas someras resultados de las mareas y/o forzamiento meteorológico teniendo en cuenta los siguientes procesos físicos:

- Gradientes en la superficie libre debido a los efectos barotrópicos.
- Efecto coriolis por la rotación de la tierra.
- Agua con densidad variable.
- Forzamientos de marea en contornos abiertos.
- Modelos de turbulencia.
- Efectos producidos por la tensión cortante que genera el viento sobre la superficie libre del mar.
- Esfuerzos cortantes sobre el fondo.
- Presión atmosférica sobre la superficie del mar variable en el espacio y el tiempo.
- Fuerzas generadas por las mareas.

Con él se obtienen los niveles, el campo de velocidades, las tensiones sobre el fondo, la distribución de salinidad y temperatura, el transporte de sedimentos y la evolución del fondo para distintas aplicaciones.

El Delft3D-FLOW resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido incompresible, bajo la hipótesis de aguas someras y las hipótesis de Boussinesq (Deltares, 2011). A continuación se presenta una breve descripción de las ecuaciones de profundidad promediada que gobiernan el modelo hidrodinámico, más detalles pueden encontrarse en Lesser et al. (2004).

Despreciando los efectos de la precipitación y evaporación la ecuación de continuidad es

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial [h \bar{u}]}{\partial x} + \frac{\partial [h \bar{v}]}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

donde  $\bar{u}$  y  $\bar{v}$  son las velocidades en profundidades promediadas en las direcciones  $x$  e  $y$  ( $m s^{-1}$ ), respectivamente;  $h$  la profundidad (m) y  $\xi$  el nivel del agua (m).

Las ecuaciones de momento horizontal en profundidad promediada, asumiendo una ley de fricción cuadrática, velocidad nula y condiciones de contorno de deslizamiento libre (esfuerzo tangencial nulo) en el terreno; despreciando el efecto de Coriolis y del viento se escriben

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{g \bar{u} [\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}]}{C^2 h} - \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + g \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{g \bar{v} [\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}]}{C^2 h} - \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (3.3)$$

donde  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $m s^{-2}$ ),  $\nu$  la velocidad de turbulencia ( $m^2 s^{-1}$ ) y  $C$  el coeficiente de Chézy ( $m^{\frac{1}{2}} s^{-1}$ ). El coeficiente de Chézy se define como

$$C = 18 \log 12 h / k_s \quad (3.4)$$

donde  $k_s$  es la rugosidad de la escala de longitud Nikuradse.

### 3.2.2. Módulo WAVE

El módulo Delft3D-WAVE es el módulo de propagación de oleaje con el que se simulan los principales procesos de transformación del oleaje entre profundidades indefinidas y la costa. Este módulo implementa el modelo SWAM (Simulation Waves Nearshore), reconocido internacionalmente para aplicaciones ingenieriles y de investigación, y con el que se obtienen las características del oleaje cerca de la costa, así como el aumento de nivel provocado por la rotura del oleaje (set-up). Ha sido desarrollado para su aplicación en estuarios, zonas costeras, desembocaduras, lagos y embalses. Simula los siguientes procesos:

- Refracción y asomeramiento del oleaje durante su propagación sobre un fondo de profundidad variable y/o presencia de corrientes.
- Generación de oleaje por viento.
- Disipación de energía por whitecapping (decrestamiento), rotura por profundidad y fricción con el fondo (mediante tres formulaciones distintas).
- Interacciones no lineales ola-ola y ola-corriente.
- Transmisión, bloqueo o reflexión del oleaje en presencia de obstáculos.
- Difracción.

En SWAN el oleaje es descrito mediante el espectro bidimensional de densidad de acción  $N(\sigma, \theta)$  en lugar del espectro de densidad de energía  $E(\sigma, \theta)$ . Por tanto la evolución de la energía del oleaje es descrita por la ecuación espectral de balance de la acción,  $N(\sigma, \theta)$  a partir de condiciones arbitrarias de viento, corrientes y batimetría, siendo  $\sigma$  la frecuencia y  $\theta$  la dirección de propagación. Esto es debido a que en presencia de corrientes, la densidad de acción se conserva mientras que la densidad de energía no (Whitham, 1974).

La densidad de acción es igual a la densidad de energía dividida por la frecuencia relativa  $N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$ .

En su forma general, esta ecuación de conservación de la acción se presenta:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (C_x N)}{\partial x} + \frac{\partial (C_y N)}{\partial y} + \frac{\partial (C_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial (C_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (3.5)$$

(Hasselmann et al., 1973)

El primer término de la parte izquierda representa la evolución local a lo largo del tiempo de la densidad de la acción, el segundo y el tercer término representan la propagación de  $N(\sigma, \theta)$  en el espacio geográfico (con velocidades de propagación  $C_x$  y  $C_y$ ), el cuarto término representa los cambios de la frecuencia relativa debido a las variaciones de la batimetría y las corrientes (siendo  $C_\sigma$  la velocidad de propagación en el espacio  $\sigma$ ). El quinto término representa la refracción del oleaje producida por los cambios de profundidad y corrientes (con velocidad de propagación  $C_\theta$  en el espacio  $\theta$ ).

El término de la derecha ( $S = S(\sigma, \theta)$ ) es el término fuente de energía y es representado como la superposición de varios términos fuente:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds,w} + S_{ds,br} + S_{ds,b} \quad (3.6)$$

- $S_{in}$ : Transferencia de energía al oleaje debida al viento.
- $S_{nl}$ : Interacciones no lineales entre olas.
- $S_{ds,w}$ : Disipación de energía en aguas profundas debidas al White-capping.
- $S_{ds,br}$ : Término debido a la rotura por disminución de la profundidad.
- $S_{ds,b}$ : Disipación de energía por fricción con el fondo.

### 3.3. Implementación del modelo en la zona de estudio

Para implementar el modelo en la zona de estudio es necesario definir todos los parámetros y datos de entrada que requiere el modelo numérico Delft3D. Principalmente estos son:

- Periodo de tiempo.
- Grid.
- Batimetría.
- Archivo Wavecom.
- Parámetros del modelo.
- Condiciones de contorno.

La única diferencia entre los dos escenarios que se han modelado es la batimetría, por ello, el resto de apartados son idénticos.

#### 3.3.1. Periodo de tiempo

En este trabajo, el modelo ha sido implementado para simular periodos de 30 días, concretamente el periodo simulado ha sido desde el 22/08/10 a las 00:00:00 hasta el 21/09/10 a las 23:00:00.

Los resultados de una simulación de duración 30 días son suficiente para alcanzar los objetivos de este proyecto, ya que se da un ciclo lunar completo (de duración aproximada 29 días y medio) y, por tanto, se modelan tanto mareas vivas (cuando la amplitud de la marea es máxima, que sucede en las lunas nuevas y en las lunas llenas) como mareas muertas (la amplitud de la marea es mínima, y sucede en los cuartos menguantes y cuartos crecientes).

Por otro lado, este periodo concreto ha sido elegido en base a las fechas en las que se realizó la campaña de campo empleada para la calibración del modelo y, por tanto, se tienen medidas reales de determinadas variables.

#### 3.3.2. Grid

El grid o malla es la discretización del dominio físico para la propagación del oleaje y modelado hidrodinámico. El diseño de la malla es un proceso que debe basarse en la experiencia y en el ensayo-error.

Los criterios empleados para la definición de la malla han sido:

- Asegurar una buena precisión en la zona de la desembocadura, que es la zona en la que se centra el proyecto.
- Evitar vértices que concentren mucha energía y que puedan impedir una buena propagación del oleaje.



- Orientar la malla correctamente para que abarque el oleaje predominante.

En la figura 3.5 se observa la malla empleada en el modelo. El tamaño de la malla es de 351 x 361 celdas, no siendo todas de tamaño uniforme, sino que en la zona de la desembocadura del río está refinada lo necesario para que el modelo capture las profundidades y características relevantes. Las celdas mayores tienen dimensiones 175 x 85 m (M x N) y las menores 5 x 12 m (M x N).

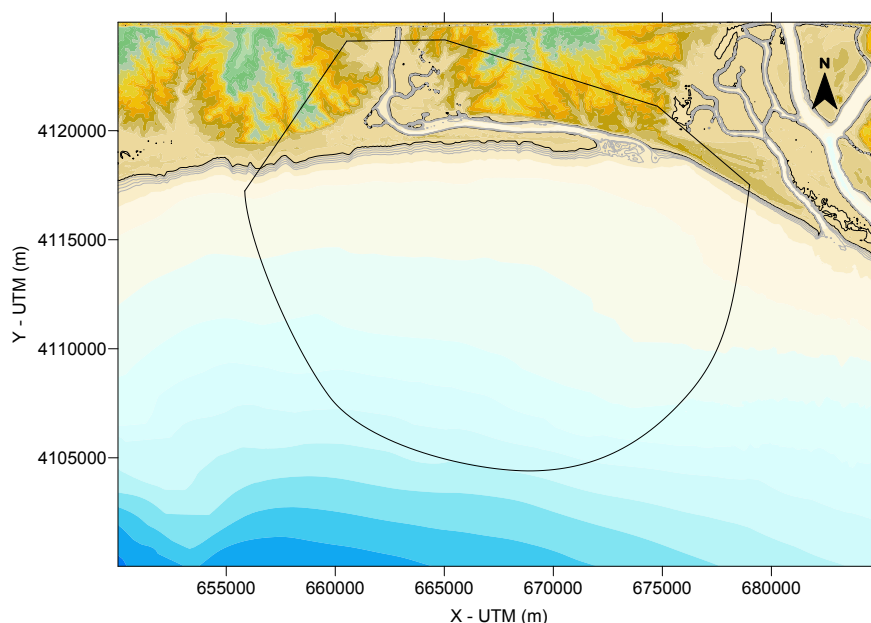


Figura 3.5: Definición del contorno del grid empleado.

### 3.3.3. Batimetría

En el Apartado 3.1 se han definido las dos batimetrías de partida. Ambas fueron proporcionadas en formato archivo de texto con las coordenadas X, Y y Z de cada punto. El primero de ellos, proporcionado por el Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales, tiene una precisión de 50 x 50 m y abarca toda la costa onubense. Sin embargo, como puede observarse en la figura 3.6, no representa con suficiente detalle la topografía de los bajos de la desembocadura. Por ello, se ha decidido combinar esta batimetría con la proporcionada por Juan Antonio Morales, que tiene mayor precisión, 10 x 10 m, y fecha concreta, Abril de 2010, aunque abarca únicamente la batimetría de la desembocadura del río Piedras (Figura 3.7).

Para obtener el resultado final, se ha empleado el programa ArcGIS, en el que se han creado rasters a partir de ambos ficheros de puntos, se ha unificado el sistema de referencia <sup>2</sup> y diferencia de referencia de cotas entre ambas, y se ha creado un mosaico en el que en las zonas coincidentes entre ambos rasters, el resultado ha sido la batimetría más precisa de la figura 3.7.

<sup>2</sup>Coordenadas UTM y sistema de referencia ETRS89.



Figura 3.6: Recorte de la batimetría de precisión 50 x 50 m.



Figura 3.7: Batimetría con mayor precisión de la desembocadura - 10 x 10 m.

Por último, la batimetría se ha exportado de ArcGIS a un archivo de texto con las coordenadas X, Y y Z de cada punto para importarlo en Delft3D y asignar a cada celda de la malla una profundidad.

La referencia topográfica de la batimetría final (Figura 3.8) será el nivel medio del mar local.



Figura 3.8: Definición de la batimetría empleada.

La batimetría resultado de la figura 3.8 es empleada para simular el Escenario 1, sin embargo, la batimetría representativa del Escenario 2 se ha creado a partir de esta como se ha descrito en el apartado 3.1.

### 3.3.4. Archivo Wavecon

Este archivo contiene los datos de oleaje a propagar y que usa el módulo WAVE. Consiste en un archivo de texto formado por ocho columnas: Tiempo, altura de ola significativa ( $H_s$ ), periodo pico ( $T_p$ ), dirección de procedencia de oleaje ( $\theta$ ), dispersión ( $ms$ ), nivel de la superficie libre ( $\eta$ ), velocidad del viento ( $V_v$ ) y dirección de procedencia del viento ( $\theta_v$ ). Todos estos valores han sido obtenidos a partir de la información proporcionada por Puertos del Estado del punto "SIMAR 5029023"; con la cual se define un valor por cada hora durante los 30 días del periodo de simulación.

### 3.3.5. Parámetros del modelo

El programa necesita un valor para cada uno de sus parámetros internos de los módulos WAVE y FLOW. La correcta definición de estos valores para la zona de estudio constituye el proceso de calibración del modelo numérico, sin embargo, como datos de partida se tomarán valores de modelos calibrados en zonas cercanas como la Bahía de Cádiz (Zarzuelo, 2012).

### 3.3.6. Condiciones de contorno

En el estuario del río Piedras predomina el forzamiento mareal. Por ello, en el contorno “Sea” (2,1; 351,1) se han impuesto condiciones abiertas del tipo de nivel con forzamiento astronómico incluyendo los nueve armónicos de marea más significativos (con amplitud mayor a 4 cm). Los armónicos de marea que se han tenido en cuenta, así como su amplitud y fase, han sido obtenidos de los datos del mareógrafo más cercano “Huelva 5”, representados en la tabla 2.6.

En un primer momento también se definió una condición de contorno tipo descarga total en la zona de la desembocadura, introduciendo una serie de valores de caudal en función del tiempo, aguas abajo de la última presa que existe en el cauce del río. Sin embargo, como el caudal es prácticamente nulo se ha eliminado.

## 3.4. Calibración del modelo

Para la calibración del modelo numérico es necesario disponer de datos de nivel del mar, mareas, velocidad de corriente y dirección medidos en determinados puntos de la zona de estudio para poder comparar con los resultados de las simulaciones realizadas.

En este caso, no ha sido posible llevar a cabo ninguna campaña de campo, ya que, como se mencionó anteriormente, es un proyecto que no cuenta con financiación. Pero sí se agradece a **Juan Antonio Morales González**, profesor de la Universidad de Huelva y autor de muchos artículos relacionados con la geología costera, su colaboración y gran aportación de ideas y datos de campañas de campos realizadas por su grupo de investigación de Geología Costera y Recursos Hídricos. Concretamente, los datos proporcionados han sido datos oceanográficos, batimétricos y sedimentológicos.

### 3.4.1. Campaña de campo

La campaña de campo que se ha empleado en este proyecto es, por tanto, la aportada por Juan Antonio Morales González. Durante la campaña de datos oceanográficos se contó con varios instrumentos que permitieron realizar las mediciones de nivel de marea, presión, velocidad y dirección de flujo.

A continuación se detallan las características de esta campaña, aunque vuelvo a hacer hincapié en que no ha sido realizada por nosotros.

#### 3.4.1.1. Instrumentación

La instrumentación que se instaló para la realización de la campaña se describe a continuación:

- Un mareógrafo con sensor de presión venteado a superficie de la marca Valeport modelo 740.
- Dos correntímetros de rotor de la marca Valeport modelo 106.

### 3.4.1.2. Ubicación de los instrumentos

Se seleccionó el Puerto Marina El Rompido como el lugar más adecuado para colocar un mareógrafo de manera segura, protegido contra actos de vandalismo, y facilidad para referenciarlo a una referencia altimétrica fiable y estable.

Se realizaron dos campañas de medida de corrientes. En cada campaña se emplearon dos correntímetros en dos puntos de la desembocadura del río. En la tabla 3.1 se define la posición concreta de la instrumentación y se muestra en la figura 3.9.

Estación	Campaña	Localización	Coordenada X	Coordenada Y
106/1	1	Río Piedras – Boya 11	669286.25 E	4119975.87 N
106/2	1	Desembocadura	674184.88 E	4117895.00 N
106/3	2	Canal levante	673516.84 E	4119365.51 N
106/4	2	Canal poniente	672456.42 E	4119241.18 N

Tabla 3.1: Ubicación de las campañas de medida de corrientes.



Figura 3.9: Ubicación de los instrumentos.

### 3.4.1.3. Fechas y duración de la campaña

La toma de datos se desarrolló desde enero de 2009 hasta diciembre de 2011. La instalación del mareógrafo permitió la medición ininterrumpida de la marea durante un año, con objeto de realizar el análisis completo de la onda de marea con todas sus componentes. Mientras que las campañas de medidas de corriente permitieron obtener valores de intensidad, dirección y sentido de las corrientes durante un mes completo.



Estación	Campaña	Inicio	Fin
106/1	1	25/08/2010	30/09/2010
106/2	1	25/08/2010	30/09/2010
106/3	2	07/07/2011	04/08/2012
106/4	2	07/07/2011	04/08/2012

Tabla 3.2: Fechas de las campañas de medida de corrientes.

#### 3.4.1.4. Resultados de la campaña de campo

De todos los datos disponibles de la campaña de campo, en este proyecto se han empleado, para la calibración y validación del modelo, únicamente los datos de las campañas realizadas en las estaciones E106/1 y E106/2. Esta decisión se ha tomado en base a que estos puntos no se encuentran en los bajos de la desembocadura, los cuales se encuentran sometidos a corrientes de marea intensas y oleajes exteriores elevados, que provoca que se caractericen por una intensa dinámica sedimentaria.

En las figuras 3.10 y 3.11 se muestran las series de datos medidos con los correntímetros en las estaciones E106/1 y E106/2, respectivamente.

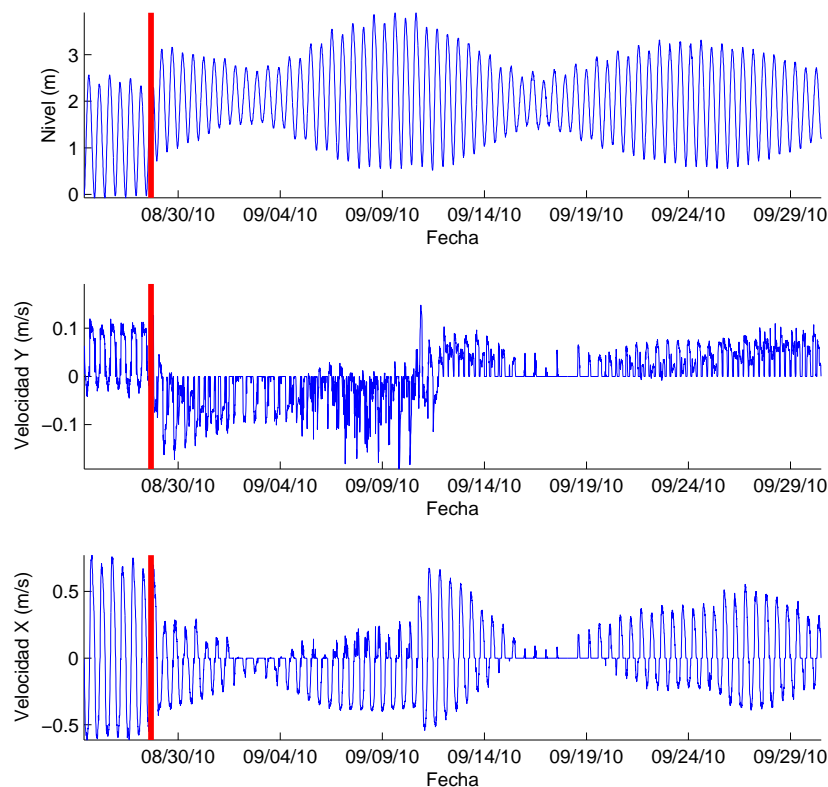


Figura 3.10: Datos medidos en la Estación E106/1.

Según refleja el informe realizado por Juan Antonio Morales González (Morales, 2012), al recuperar la Estación 106/1 se observó que la gran intensidad de corriente ha-

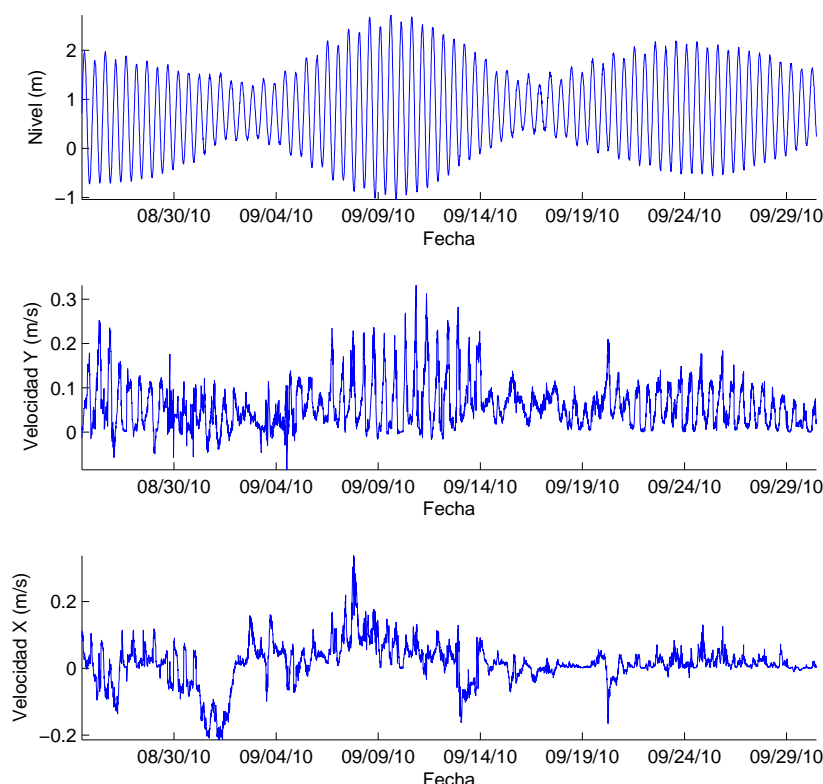


Figura 3.11: Datos medidos en la Estación E106/2.

bía erosionado el fondo bajo el muerto de hormigón provocando que este volcara sobre sí mismo, lo que supuso una modificación de la cota de fondeo del instrumento. Este evento se puede apreciar claramente en las medidas (Figura 3.10) y se registró el 29/08/2010 a las 19:00 UTC (17:00 hora local). El correntímetro bajó 0.5 m con respecto al nivel inicial de fondeo.

Por tanto, ha sido necesario analizar y modificar los datos medidos en la Estación E106/1. Los datos del nivel se han corregido perfectamente, como se refleja en la figura 3.12, sin embargo, en los datos de velocidad, tanto vertical como horizontal, se aprecia también que a partir de ese momento no sigue una tendencia y estos son más difíciles de modificar.

### 3.4.2. Implementación de la calibración

Para la calibración del modelo numérico se elige un periodo de tiempo de entre 48 y 96 h de duración en el que se realizan diferentes simulaciones modificando el valor de los parámetros para tratar de ajustar los resultados de nivel del agua y velocidades de corriente con las medidas realizadas por los instrumentos en la estaciones consideradas.

Los parámetros que se modificarán para conseguir la calibración del modelo son el coeficiente de rugosidad de Chezy (en ambas direcciones) y el coeficiente de arrastre por

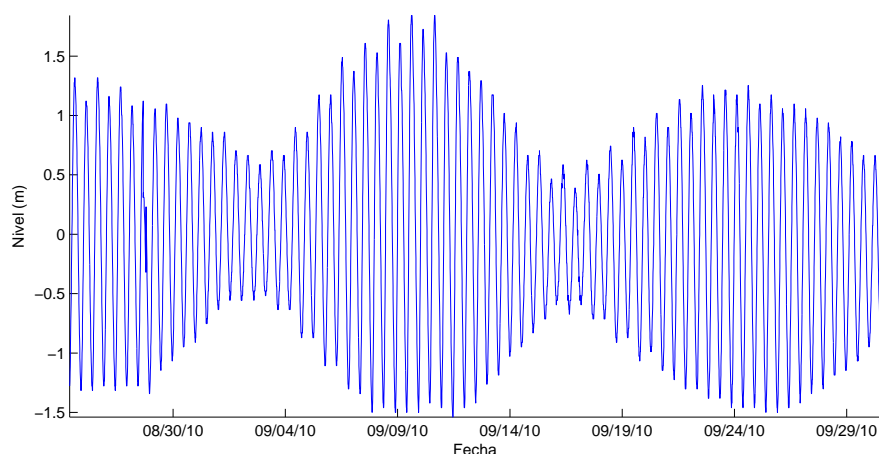


Figura 3.12: Corrección de los datos de nivel medidos en la Estación E106/1.

viento  $C_D$ . Para un primer tanteo se usarán los datos utilizados en estudios cercanos, en la Bahía de Cádiz (Zarzuelo, 2012).

#### 3.4.2.1. Periodo de tiempo de calibración

Como se ha explicado en el apartado 3.4.1, durante la toma de datos en la Estación 106/1, a los pocos días de comenzar la medición, surgió un evento inoportuno que provocó que todos los datos registrados a partir de ese instante no fueran reales, ya que el correntímetro había volcado y su cota bajó 0.5 m respecto al nivel inicial de fondeo.

Por esta razón se ha optado emplear como periodo de calibración el periodo de tiempo desde el inicio de la campaña de campo hasta que el correntímetro volcó. Concretamente el periodo de tiempo es desde 25/08/2010 a las 9:10 h hasta el 28/08/2010 a las 16:00h.

#### 3.4.2.2. Puntos de control

También se ha explicado que los puntos de control empleados para la calibración son las estaciones E106/1 y E160/2, porque se localizan próximos a los bajos pero en el exterior de estos.

Sin embargo, debido al infortunio de que la Estación E106/2 está ubicada en la intersección de las dos batimetrías descritas anteriormente (Apartado 3.3.3), se reconoce que los resultados del modelo en este punto no sean totalmente reales y se tendrán más en cuenta los resultados en la Estación 106/1.

#### 3.4.2.3. Proceso de calibración

Para un primer tanteo se han utilizado los datos utilizados en estudios cercanos, en la Bahía de Cádiz (Zarzuelo, 2012). Concretamente, en este estudio se concluye que los valores de los parámetros que mejor ajustan el modelo a la realidad son coeficientes de rugosidad de Chézy 80(U) y 60(V), y coeficiente de arrastre por viento 0.005.



Para una primera simulación se tomaron estos valores. Posteriormente, se modificaron únicamente los valores del coeficiente de Chézy hasta determinar el par que mejor se ajustan a las mediciones y, una vez definidos estos, se modificó el valor del coeficiente de arrastre por viento hasta concluir el valor que proporciona un mejor ajuste.

Las simulaciones realizadas han sido las indicadas en la tabla 3.3.

Simulación	Coef. Chézy (U)	Coef. Chézy (V)	$C_d$
1	80	60	0.005
2	60	40	0.005
3	100	80	0.005
4	60	80	0.005
5	70	60	0.005
6	70	60	0.0005
7	70	60	0.05

Tabla 3.3: Simulaciones realizadas para calibrar el modelo.

La coherencia entre el modelo y lo observado es analizada por el error cuadrático medio (RMSE (3.7)), el coeficiente de correlación (R(3.8)) y el coeficiente de Skill (S(3.9)). Puede ocurrir dos situaciones:

- **La simulación mejora respecto a la anterior:** En este caso se vuelve a modificar el mismo parámetro para tratar de ajustarlo hasta que los resultados de la simulación no mejoren respecto de la simulación anterior.
- **La simulación no mejora respecto de la anterior:** En este caso se cambia de parámetro y se repite todo el proceso.

Repitiendo este proceso para cada uno de los parámetros del modelo y para diferentes periodos de tiempo se obtienen unos valores para cada parámetro que permiten propagar el oleaje de forma precisa sean cuáles sean las condiciones de la zona de estudio.

#### Definición de los parámetros de correlación

Considerando que  $M_n$  y  $C_n$  son los datos observados y los modelados, respectivamente, a N puntos. El RMSE viene dado por:

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (M_n - C_n)^2 \right]^{1/2} \quad (3.7)$$

El coeficiente de correlación (R) entre  $M_n$  y  $C_n$  es definido por:

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (M_n - \bar{M}_n)(C_n - \bar{C}_n)}{\sigma_C \sigma_M} \quad (3.8)$$

Donde  $\sigma_M$  y  $\sigma_C$  son las desviaciones típicas de los datos observados y modelados, respectivamente. La barra superior significa la media de la serie de datos. El valor de  $R$  puede oscilar entre  $-1 \leq R \leq 1$  siendo mejor el ajuste cuanto más próximo esté  $R$  de -1 o 1.

El coeficiente de Skill ( $S$ ) viene dado por:

$$S = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N |C_n - M_n|^2}{\sum_{n=1}^N (|C_n - \bar{M}_n|^2 + |M_n - \bar{M}_n|^2)} \quad (3.9)$$

El valor de Skill puede oscilar entre 0 y 1, siendo 1 un ajuste perfecto.

### 3.4.3. Resultados de la calibración del modelo

El modelo ha mostrado ser sensible a las variaciones de batimetría y topografía, así como a la rugosidad y a los parámetros de calibración primaria. Los coeficientes de rugosidad de Chézy con los que se ha obtenido un mejor ajuste son 70(U) y 60(V). Otro parámetro que se ajustaba al modelo es el coeficiente de arrastre por viento, cuya variación era poco significativa, y se ha tomado un valor de 0.005.

En la figura 3.13 se presenta la comparación de los resultados de las siete simulaciones realizadas con las mediciones de la campaña de campo en la Estación E106/1. En color rojo se representan los valores de la campaña de campo y en color azul el resultado de la simulación que consigue un mejor ajuste.

En la figura 3.14 se presenta la comparación de los resultados en la Estación E106/2.

Aunque con estas gráficas se puede obtener una idea de qué conjunto de valores ajustan peor o mejor la realidad al modelo, la decisión se ha tomado mediante el cálculo de los parámetros de correlación descritos anteriormente, calculados para cada simulación y cada variable.

En las tablas 3.4 y 3.5 se aprecia claramente como la simulación con coeficiente de rugosidad de Chézy 70 (U) y 60 (V) y coeficiente de arrastre por viento 0.005 es la que se vincula con mejores valores de los parámetros de correlación.

Este conjunto de valores proporciona unos resultados en la Estación E106/1 de nivel del mar y velocidad en la dirección X magníficos. La falta de precisión en la velocidad en la dirección Y es aceptable, porque los valores medidos son de menor orden de magnitud. En cambio, en la Estación E106/2 el modelo ajusta bastante bien el nivel del mar pero no lo suficiente las velocidades. Sin embargo, se acepta por la explicación de la traba con las batimetrías explicada anteriormente.

Por último, con objeto de constatar este resultado de calibración, se ha realizado una simulación con un periodo de tiempo mayor y con los valores de los parámetros calibrados. Concretamente el periodo de tiempo simulado ha sido desde el 25/08/2010 a las 9:10 h hasta el 05/09/2010 a las 23:00h.

Los resultados del modelo se plasman con una línea azul, mientras que los datos de la campaña de campo se representan con una línea roja. En la Estación E106/2 ocurre

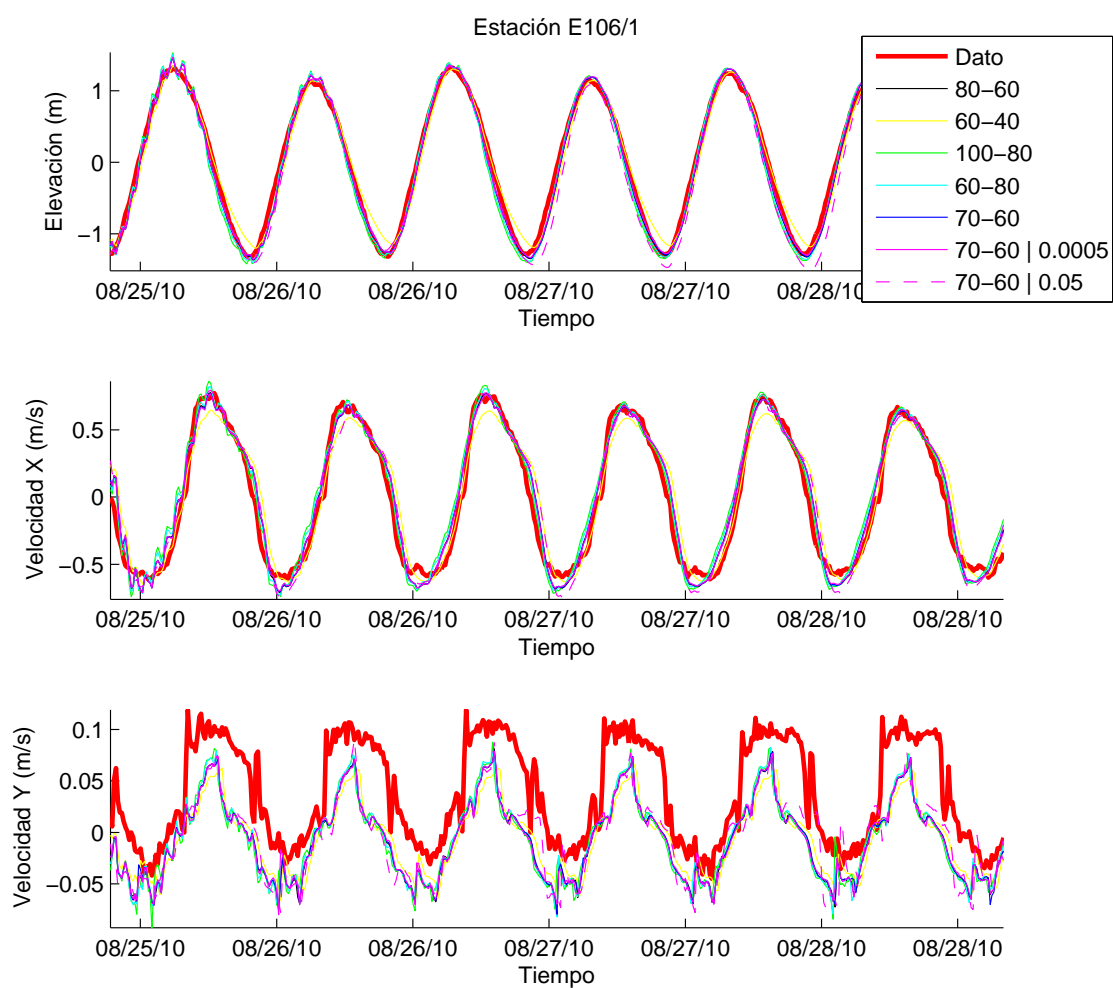


Figura 3.13: Calibración con todas las simulaciones - E106/1.

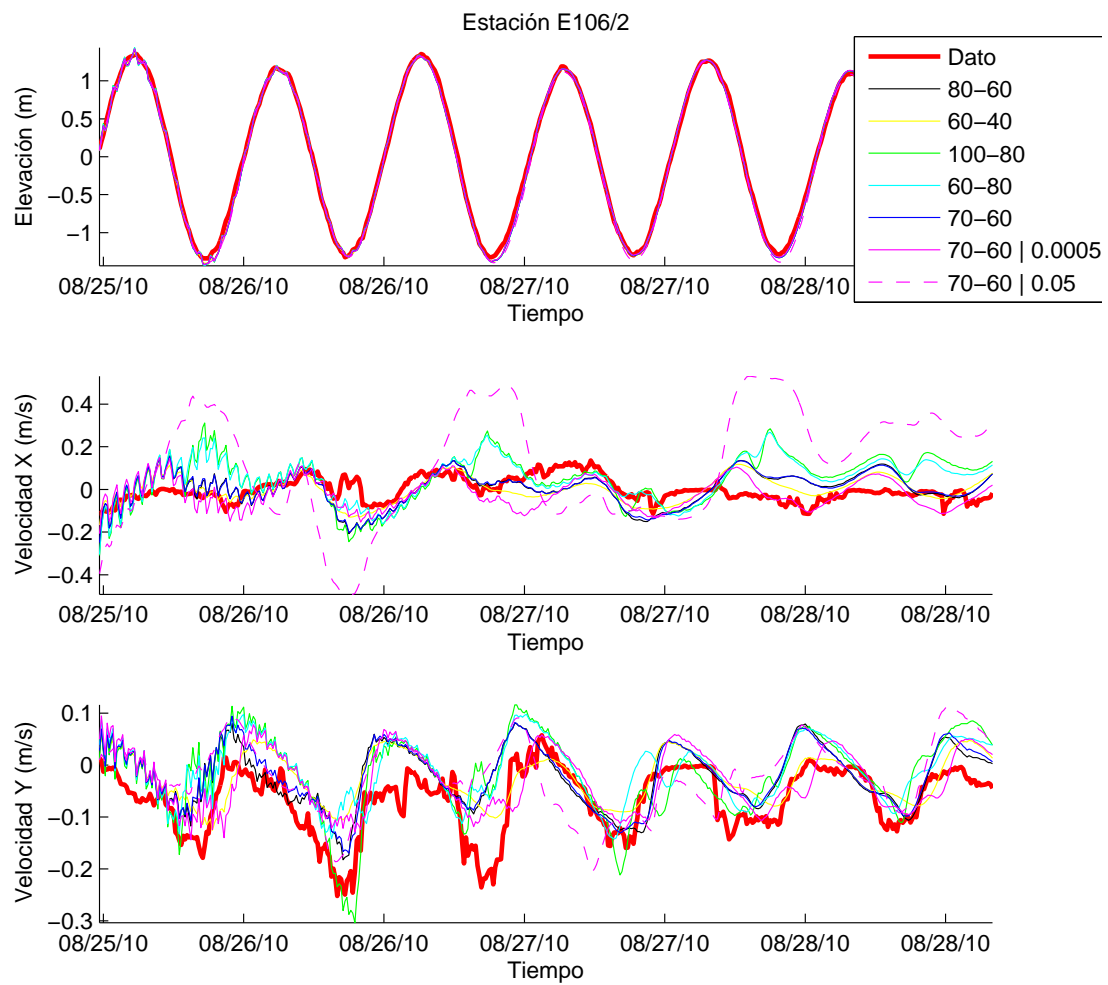


Figura 3.14: Calibración con todas las simulaciones - E106/2.

E1							
NIVEL MAR							
Cd	0.005			0.05 0.0005			
Chézy	80-60	60-40	60-80	100-80	70-60	70-60	70-60
RMSE	0.094	0.144	0.108	0.126	0.092	0.184	0.088
R	0.990	0.981	0.990	0.989	0.990	0.985	0.990
S	0.994	0.986	0.993	0.990	0.995	0.979	0.995
VELOCIDAD X							
Cd	0.005			0.05 0.0005			
Chézy	80-60	60-40	60-80	100-80	70-60	70-60	70-60
RMSE	0.096	0.132	0.100	0.108	0.096	0.116	0.095
R	0.979	0.961	0.978	0.975	0.979	0.970	0.979
S	0.981	0.961	0.979	0.976	0.980	0.972	0.981
VELOCIDAD Y							
Cd	0.005			0.05 0.0005			
Chézy	80-60	60-40	60-80	100-80	70-60	70-60	70-60
RMSE	0.052	0.051	0.052	0.053	0.052	0.051	0.052
R	0.822	0.884	0.865	0.855	0.873	0.849	0.870
S	0.305	0.286	0.330	0.304	0.312	0.360	0.305

Tabla 3.4: Parámetros de correlación entre los resultados del modelo y campaña de campo en la Estación E106/1.

<b>E2</b>							
<b>NIVEL MAR</b>							
Cd	0.005			0.05			0.0005
Chézy	80-60	60-40	60-80	100-80	70-60	70-60	70-60
RMSE	0.048	0.045	0.051	0.051	0.048	0.066	0.048
R	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993
S	0.999	0.999	0.998	0.998	0.999	0.997	0.999
<b>VELOCIDAD X</b>							
Cd	0.005			0.05			0.0005
Chézy	80-60	60-40	60-80	100-80	70-60	70-60	70-60
RMSE	0.064	0.059	0.072	0.073	0.065	0.082	0.061
R	0.698	0.721	0.711	0.713	0.717	0.445	0.680
S	0.430	0.420	0.283	0.465	0.411	0.203	0.491
<b>VELOCIDAD Y</b>							
Cd	0.005			0.05			0.0005
Chézy	80-60	60-40	60-80	100-80	70-60	70-60	70-60
RMSE	0.082	0.068	0.118	0.130	0.081	0.275	0.070
R	0.265	0.277	0.110	0.078	0.263	0.140	0.422
S	0.248	0.277	-0.156	-0.126	0.246	0.115	0.361

Tabla 3.5: Parámetros de correlación entre los resultados del modelo y campaña de campo en la Estación E106/2.

el mismo problema que anteriormente, es decir, no es extremadamente representativa la precisión del modelo ya que la topografía es relativamente irreal y, consecuentemente, los resultados del modelo también. Sin embargo, en la Estación 106/1 los datos de la campaña de campo han sido modificados como se describe en el apartado 3.4.1, resultando la figura 3.12. En las gráficas 2 y 3 de la figura 3.15 se observa claramente como a partir del instante en que se volcó el correntímetro en la Estación E106/1 los resultados no son coherentes, por lo que calibrar con este periodo no sería lo correcto, sino con el anterior.

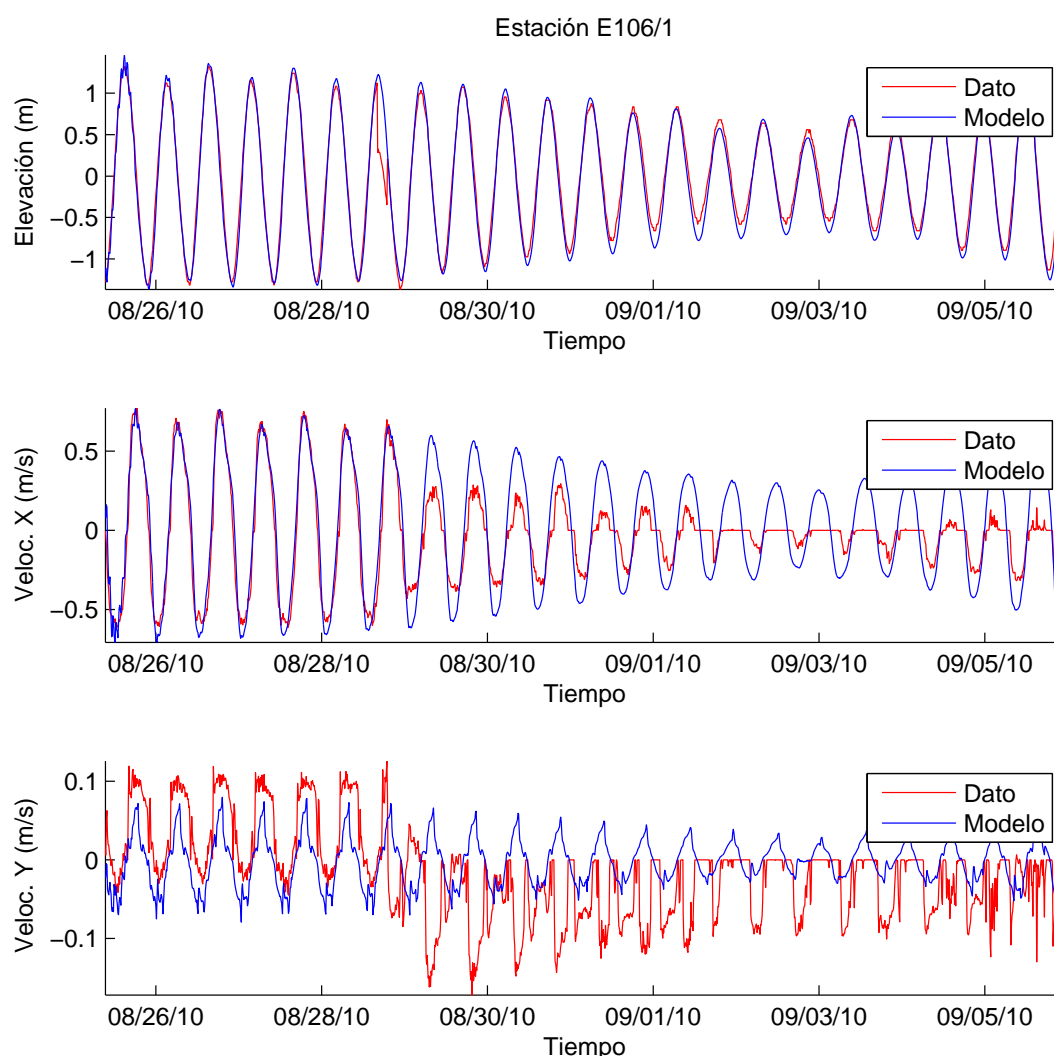


Figura 3.15: Calibración, periodo mayor con los parámetros calibrados - E106/1.

Sin embargo, además de las figuras que representan la comparación entre los valores medidos y modelados, se plasma el resultado de los parámetros de correlación.

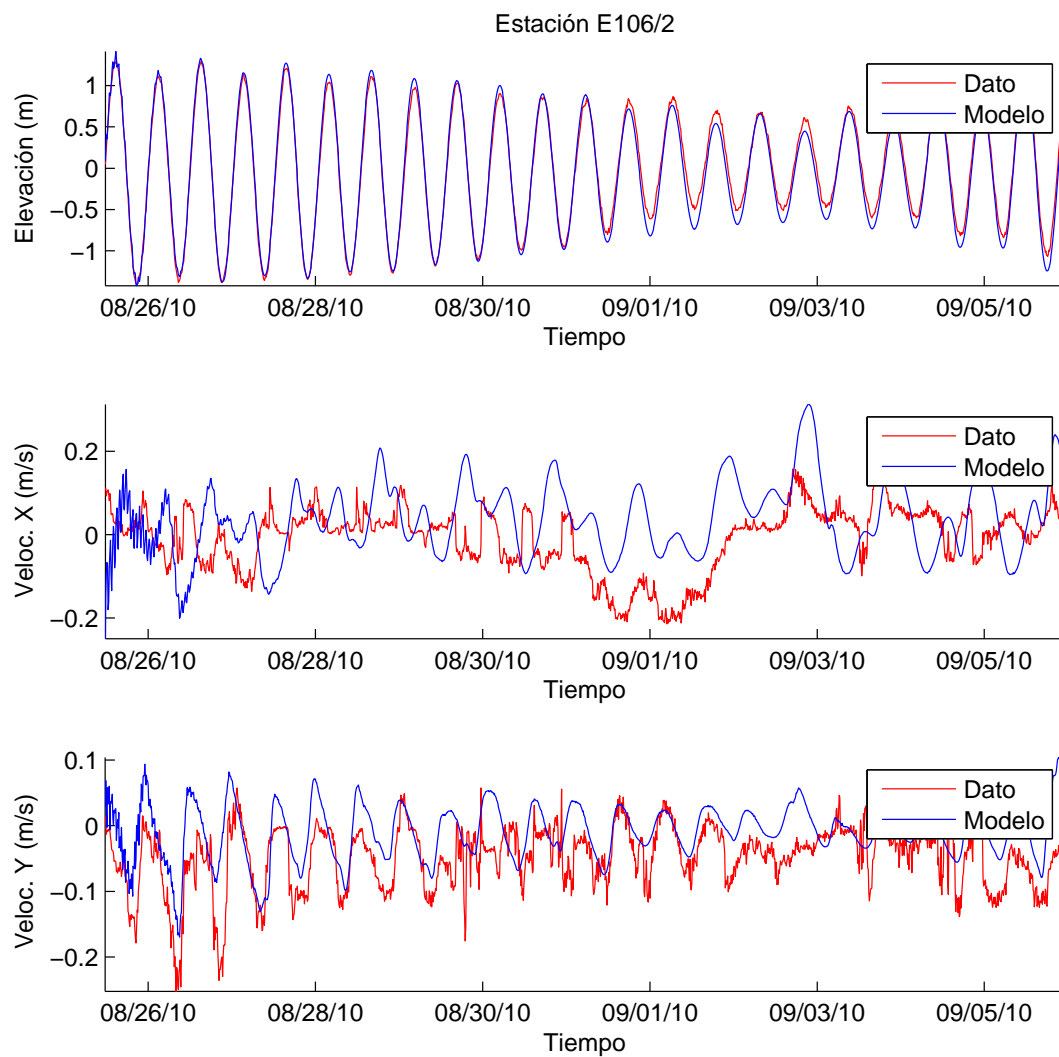


Figura 3.16: Calibración, periodo mayor con los parámetros calibrados - E106/2.

	E1			E2		
	Nivel mar	Vel. Y	Vel. X	Nivel mar	Vel. Y	Vel. X
RMSE	0.1346	0.0622	0.1899	0.1011	0.0573	0.1174
R	0.9851	0.1563	0.8789	0.9902	0.5992	0.1624
S	0.9818	0.0811	0.8427	0.9897	0.1976	0.0077

Tabla 3.6: Parámetros de correlación con los parámetros calibrados un periodo mayor.



### 3.4.4. Validación del modelo

Una vez el modelo ha sido calibrado un periodo de tiempo, se elige otro periodo distinto de los anteriores donde se simulan de nuevo el oleaje sin modificar ningún parámetro. Si el ajuste es bueno, es correcto afirmar que el modelo está bien calibrado y validado.

Para la validación del modelo el periodo de tiempo empleado es desde el 25/08/2010 a las 9:10h hasta el 21/09/2010 a las 23:00h.

La fecha inicial del modelo ha sido anterior, concretamente, el 22/08/2010 a las 00:00h, con objeto de obtener resultados del modelo durante un mes completo y que la comparación de resultados y validación se lleve a cabo sin las imperfecciones que el modelo puede crear al inicio de este. La fecha final no ha podido ser la final de la campaña de datos porque los datos proporcionados por Puertos del Estado del punto “SIMAR 5029023” están incompletos los días 22/09/2010 y 26/09/2010.

En la figura 3.17 se representa la comparación del nivel del agua resultado del modelo y de la campaña de campo en la Estación E106/1. En esta se han señalado además los periodos en los que las mareas son vivas y muertas.

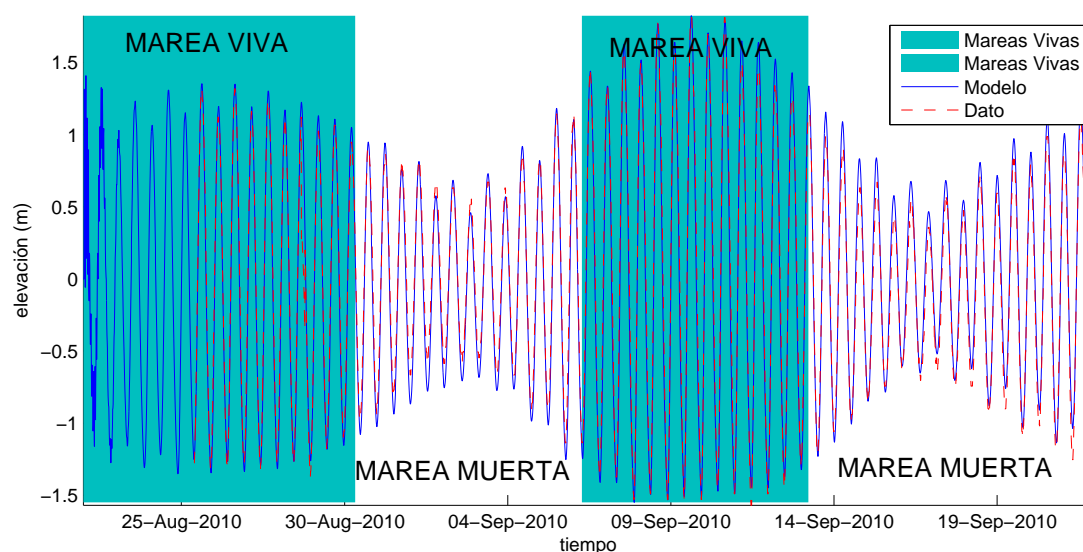


Figura 3.17: Variación del nivel del agua en la Estación E106/1.



### 4.1. Introducción

Atendiendo a los objetivos de este trabajo, se considera que los resultados hidrodinámicos más relevantes que deben de analizarse y describirse en cada escenario son:

- Variaciones del nivel del mar y la profundidad, velocidades de corriente y máximo esfuerzo cortante, tanto en planta como a lo largo de los canales de navegación. Este apartado será trascendental en el análisis de las condiciones de navegabilidad en la desembocadura.
- Búsqueda de correlaciones entre los agentes altura de ola significativa, nivel de marea astronómica o velocidad y dirección del viento, con velocidades y niveles de agua.
- Análisis de la variación de los componentes de marea a lo largo de los canales de navegación. La distribución espacial de la amplitud y fase de cada componente de marea aporta información adicional sobre los procesos de transformación en el estuario. Dichos procesos están influenciados por la anchura del estuario y cambios en la batimetría.
- Representación de las velocidades de corriente en forma de elipses de marea de la componente de marea principal, en este caso la semidiurna M2.
- Cálculo del prisma de marea. El valor del prisma de marea describirá la tasa de renovación del estuario, factor primordial en cuestiones medioambientales puesto que las descargas del río actualmente son nulas.

Con el propósito de mejorar la descripción de los resultados, se han definido dos posibles canales de navegación que seguirían los buques en sus operaciones de entrada y salida del estuario. Con las variables que se considere conveniente se representará su variación a lo largo de estos canales, esquematizados por los puntos de la figura 4.1.



Figura 4.1: Definición de dos posibles canales de navegación de los buques.

## 4.2. Resultados del Escenario 1

### 4.2.1. Hidrodinámica en la zona de estudio

Con el modelo Delft-3D se han obtenido valores de elevaciones del nivel del agua, profundidades, velocidades horizontales y máximos esfuerzos cortantes en toda la zona de estudio. A continuación se representan mapas de estas variables en los instantes de tiempo más característicos para cada una de ellas y su variación a lo largo de los canales de navegación.

#### 4.2.1.1. Elevación del nivel del agua

En las figuras 4.2 y 4.3 se ha representado el nivel del agua ( $\eta$ ) en la zona de estudio y a lo largo de los canales de navegación en cuatro instantes de tiempo. El análisis de estas figuras es decisivo para conocer el nivel del mar y la zona inundada por el agua en cada uno de los momentos. Estos instantes de tiempo se han elegido tales que sean característicos, es decir, máximos o mínimos. Por consiguiente, se ha optado por los siguientes estados de pleamar y bajamar, tanto en situaciones de mareas vivas como muertas (Tabla 4.1).

En cada panel de la figura 4.2 se ha representado la zona que se considera más relevante estudiar en cada situación de marea y se ha establecido la misma variación de colores en los dos instantes de pleamar y bajamar. En los paneles a) y c) que se representan los instantes de pleamar, con marea viva y muerta respectivamente, se ha representado toda la zona de estudio para que se aprecie la influencia de la marea en los caños mareales y se ha establecido la misma variación de colores para que las diferencias sean más claras. En las situaciones de bajamar, representados en los paneles b) y d), se ha

Instante	Marea	Fecha
Pleamar	Viva	09/Sept/2010, 15:00
Bajamar	Viva	09/Sept/2010, 21:00
Pleamar	Muerta	02/Sept/2010, 20:00
Bajamar	Muerta	03/Sept/2010, 02:00

Tabla 4.1: Instantes de representación de la elevación y profundidad.

considerado que es más significativo representar la zona de la desembocadura, pues en los estados de bajamar existen problemas de navegabilidad.

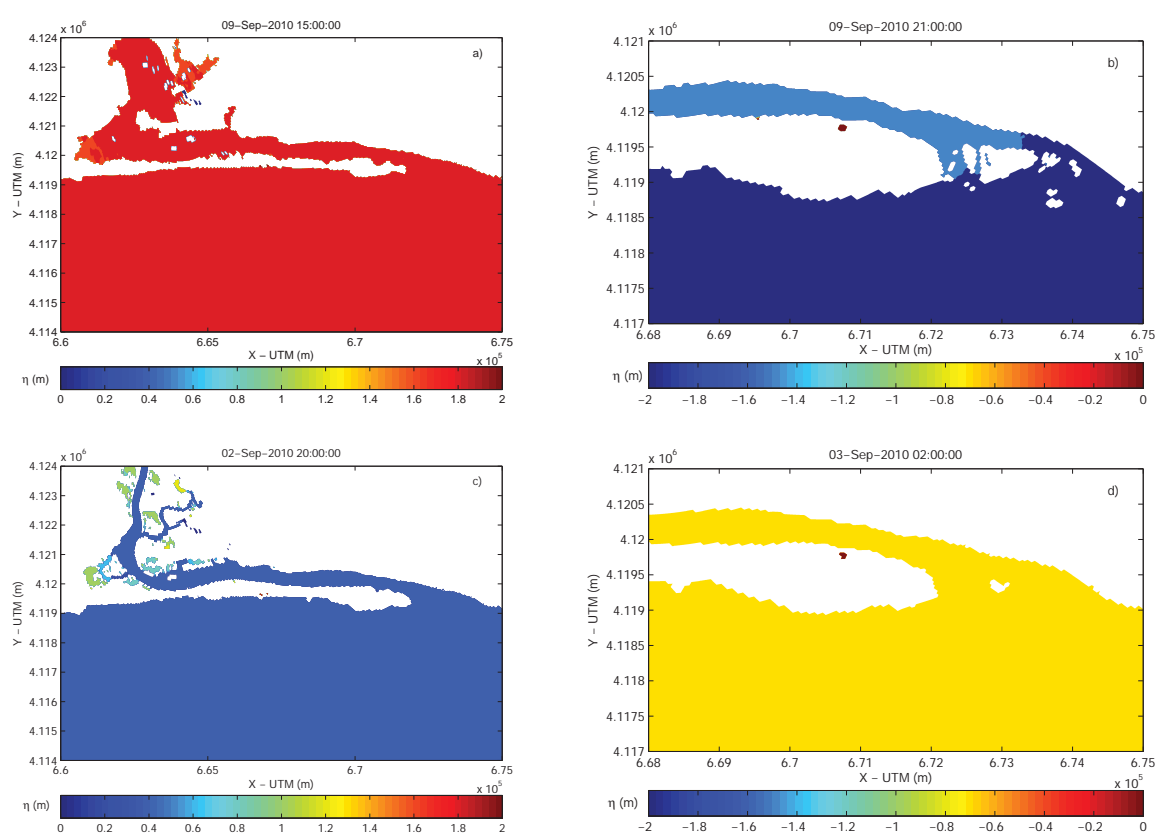


Figura 4.2: Elevación del nivel en la zona de estudio en cuatro instantes de tiempo: a) Pleamar y marea viva. b) Bajamar y marea viva. c) Pleamar y marea muerta. d) Bajamar y marea muerta.

Comparando los estados de pleamar y bajamar de la figura 4.2 se deduce que la carrera de marea en el caso de mareas muertas es únicamente de 1 m, mientras que en el caso de mareas vivas es 4 m, otorgándole una clasificación al estuario del río Piedras de mesomareal. Estos valores son concordantes con otros artículos como Morales et al. (2001).

Analizando el panel a) de la figura 4.2 se observa que las mareas tienen influencia en toda la zona modelada, inundando una amplia zona de marismas y caños aguas arriba de la desembocadura. Aunque nuestro modelo no ha abarcado una zona tan amplia

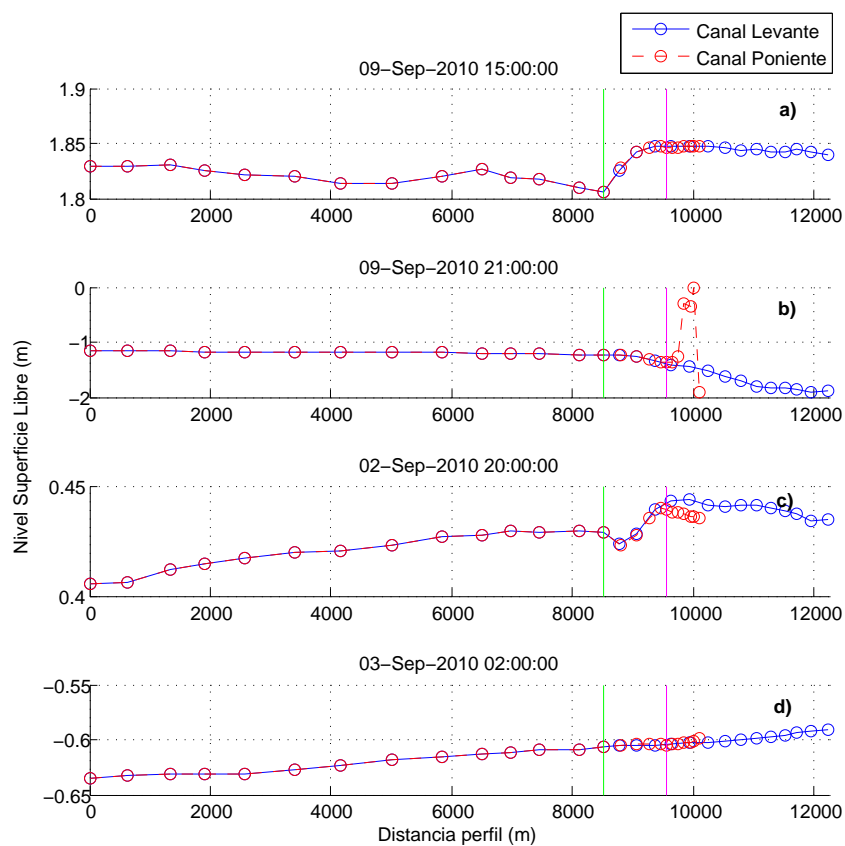


Figura 4.3: Variación de la elevación del nivel a lo largo de los canales de navegación en cuatro instantes de tiempo: a) Pleamar y marea viva. b) Bajamar y marea viva. c) Pleamar y marea muerta. d) Bajamar y marea muerta. La línea verde representa el punto de división de los canales de levante y poniente y la línea magenta el comienzo de la actuación de dragado en la canal de poniente. La distancia 0 m se corresponde con el punto más interno del río.

como para incluir la presa de los Machos, es notable la tendencia de la influencia de la marea y es posible afirmar lo que ya se citó en el Apartado 2.2.5, es decir, que la presa de los Machos se encuentra justo en el límite de la influencia de las mareas, localizada 24 km aguas arriba de la desembocadura (Morales et al., 2001).

En bajamar el calado es reducido y las condiciones de navegabilidad se dificultan para la flota de barcos mayores como, por ejemplo, los barcos pesqueros. La figura 4.3 es muy interesante, pues proporciona una idea de la variación del nivel del agua a lo largo de los canales de navegación, resaltando en el segundo panel y el canal de poniente que en una zona de este canal la elevación es mínima, e incluso nula, en el estado de bajamar viva simulado. Esos valores de elevación representan la situación de un instante de tiempo y puntos de la canal en los que el nivel del agua es nulo y, por tanto, el canal no tiene continuidad y no es navegable.

#### 4.2.1.2. Profundidad

Sin embargo, para analizar y determinar las condiciones de navegabilidad es recomendable que su examen se lleve a cabo con otra variable, "profundidad ( $d$ )", ya que el nivel del agua se encuentra referenciado al cero hidrográfico y se tendría que comparar con la profundidad del lecho. Precisamente, una de las variables que proporciona como resultado el software Delft3D se denomina "profundidad", y es la idónea para determinar la profundidad de lecho, pues esta variable representa la columna de agua sobre el fondo. En este caso también es más interesante estudiar los estados de pleamar y bajamar en casos de marea viva y muerta representados en la tabla 4.1 (Figuras 4.4 y 4.5).

Las figuras 4.4 y 4.5 son las que aportan más información en referencia a las condiciones de navegabilidad por calado. Estas figuras son complementarias a las dos anteriores y en el segundo panel de la figura 4.5 se refleja la misma situación, es decir, que en condiciones de bajamar y marea viva la profundidad puede llegar a ser nula en la canal de acceso de poniente. En la situación opuesta, pleamar y marea viva, la profundidad es suficiente, pues en todos los puntos alcanza valores superiores a 3 metros.

En el panel d) se simula un estado de bajamar y marea muerta y se observa que la profundidad es también insuficiente, siendo aceptable concluir que en el canal de poniente es de vital importancia realizar una obra de dragado para que sea navegable, pues en momentos de bajamar el calado es insuficiente. El único tramo en el que existen problemas de navegabilidad por calado es la canal de acceso de poniente, no siendo necesario por tanto obra de dragado en otras zonas.

#### 4.2.1.3. Velocidad de corriente

Otro factor influyente en las condiciones de navegabilidad de los buques es la velocidad de la corriente. En la figura 4.6 se muestra cuatro mapas en los que se ha representado de forma vectorial la intensidad y dirección de la velocidad de corriente en cuatro casuísticas que se han considerado más interesantes y en la figura 4.7 su variación a lo largo de los canales de navegación. Estos instantes de escenificación son en fechas específicas con la intención de recopilar las velocidades máximas y mínimas en mareas vivas y muertas (Tabla 4.2).

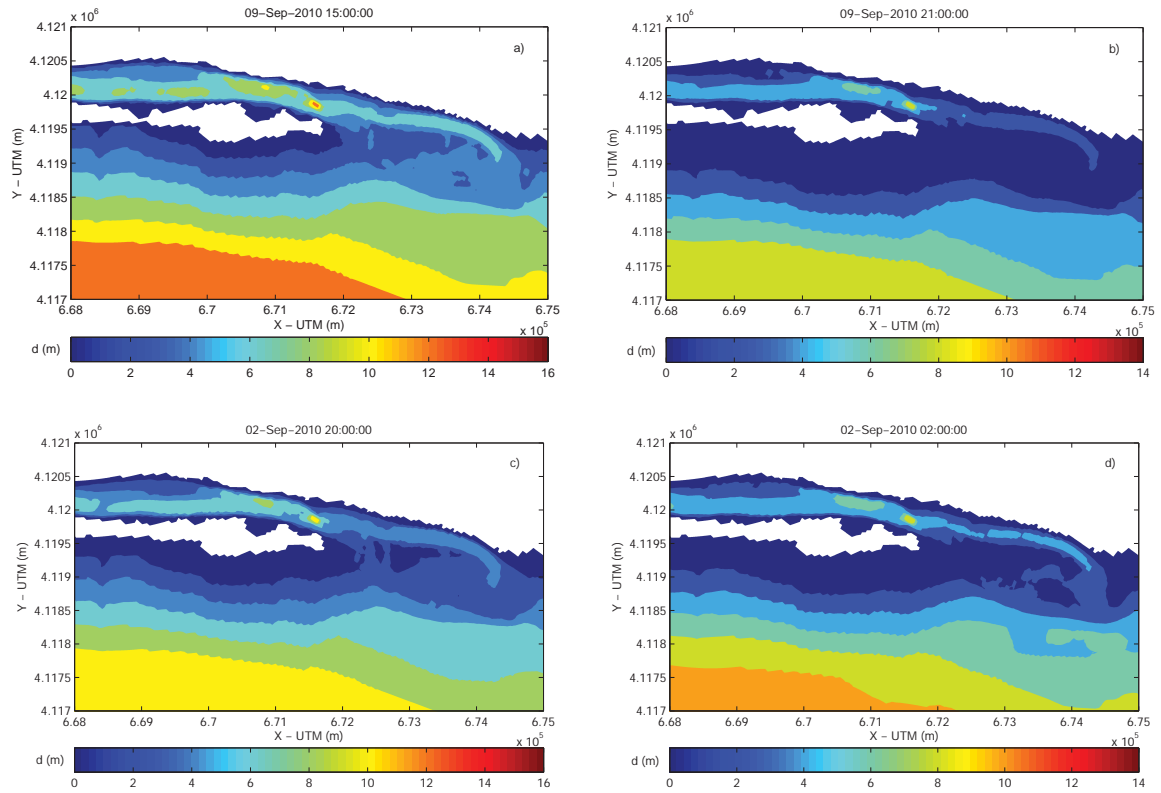


Figura 4.4: Profundidad en la zona de estudio en cuatro instantes de tiempo: a) Pleamar y marea viva. b) Bajamar y marea viva. c) Pleamar y marea muerta. d) Bajamar y marea muerta.

Instante	Marea	Fecha
Llenante	Viva	09/Sept/2010, 12:00
Vaciante	Viva	09/Sept/2010, 18:00
Llenante	Muerta	02/Sept/2010, 18:00
Vaciante	Muerta	03/Sept/2010, 00:00

Tabla 4.2: Instantes de representación de la velocidad de corriente y máximo esfuerzo cortante.



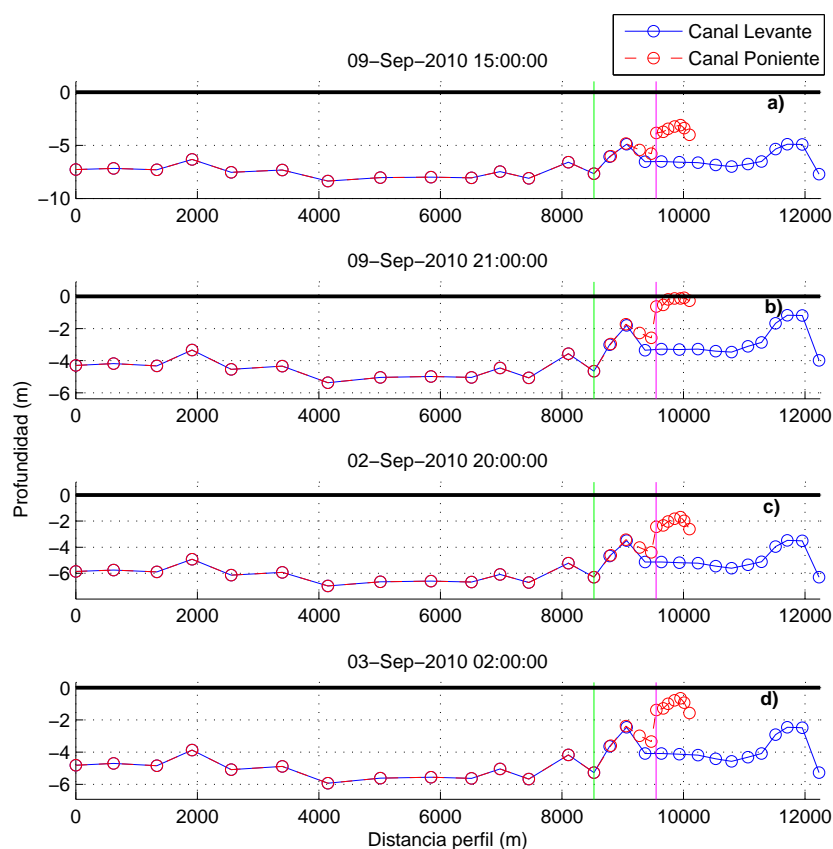


Figura 4.5: Variación de la profundidad a lo largo de los canales de navegación en cuatro instantes de tiempo: a) Pleamar y marea viva. b) Bajamar y marea viva. c) Pleamar y marea muerta. d) Bajamar y marea muerta. La línea verde representa el apunto de división de los canales de levante y poniente y la línea magenta el comienzo de la actuación de dragado en el canal de poniente. La distancia 0 m se corresponde con el punto más interno del río.

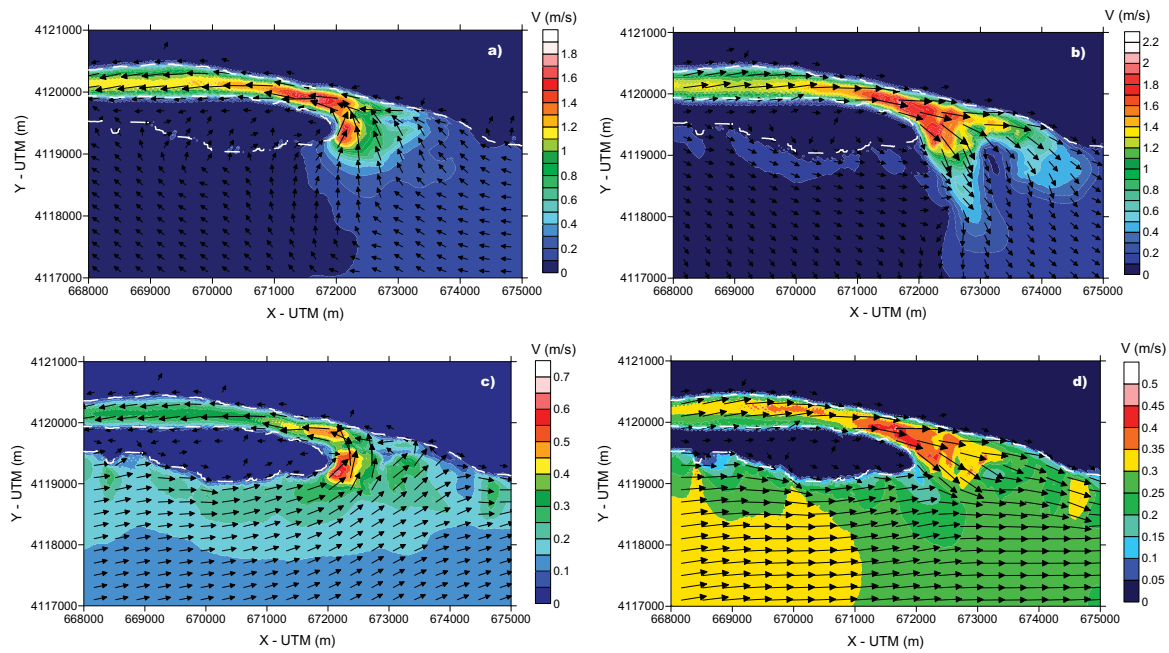


Figura 4.6: Velocidad de corriente en cuatro instantes de tiempo: a) Llenante y marea viva. b) Vaciante y marea viva. c) Llenante y marea muerta. d) Vaciante y marea muerta.

En la figura 4.6 se han representado los mapas de velocidades en la desembocadura, pues es la zona en la que los valores son mayores. Se observa como en las etapas de marea viva las velocidades en la desembocadura son mayores cuando la marea está vaciando que llenando y pueden llegar a alcanzar casi 2 m/s, en cambio, cuando las mareas son muertas la velocidad de corriente en la desembocadura tiene valores en torno a 0.5 m/s.

Las oscilaciones de las velocidades a lo largo del canal siguen un comportamiento similar entre mareas vivas y muertas (Figura 4.7). Los paneles a) y b) de la figura 4.7 nos permiten observar como en los estados de marea llenante la velocidad aumenta notablemente en la parte final de los canales de navegación, es decir, en las canales de acceso, mientras que en los casos de marea vaciante, en general existe una tendencia a aumentar la velocidad a lo largo del río hasta la desembocadura, seguido de una notable disminución de las velocidades en su salida al mar.

#### 4.2.1.4. Máximo esfuerzo cortante

Los mapas de la figura 4.8 de máximo esfuerzo cortante no tienen demasiada trascendencia en las condiciones de navegabilidad. Sin embargo, sí que son interesantes pues proporcionan una idea global de las zonas en las que hay tendencia a la erosión o sedimentación del fondo. Además, en la figura 4.9 se muestra su variación a lo largo de los canales de navegación.

En la figura 4.8 los paneles más interesantes son a) y b), representativos de estados de mareas vivas en situaciones de marea llenante y vaciante, respectivamente. Estas gráficas permiten apreciar como, en general, las velocidades máximas se localizan donde

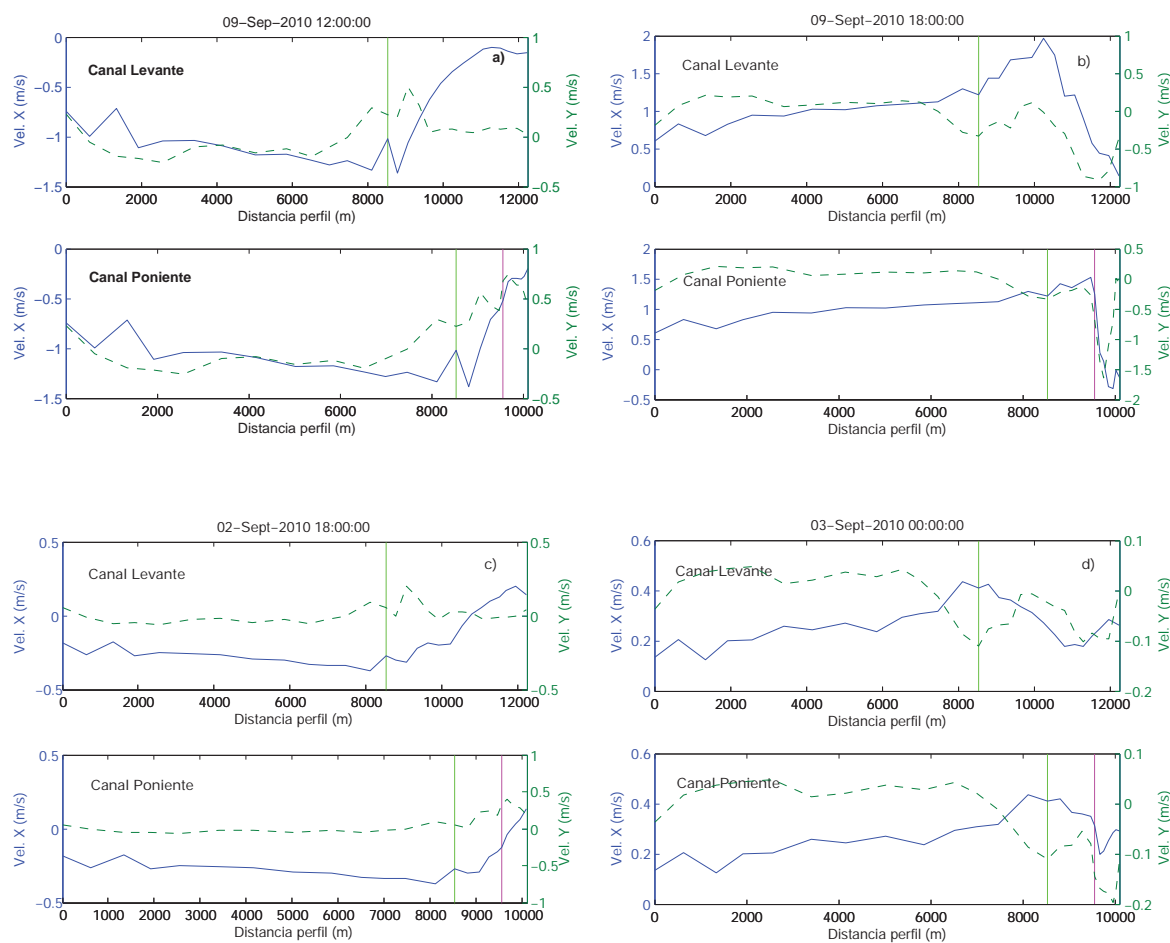


Figura 4.7: Variación de la velocidad de corriente a lo largo de los canales de navegación en cuatro instantes de tiempo: a) Llenante y marea viva. b) Vaciante y marea viva. c) Llenante y marea muerta. d) Vaciante y marea muerta. La línea verde representa el punto de división de los canales de levante y poniente y la línea magenta el comienzo de la actuación de dragado en la canal de poniente. La distancia 0 m se corresponde con el punto más interno del río.

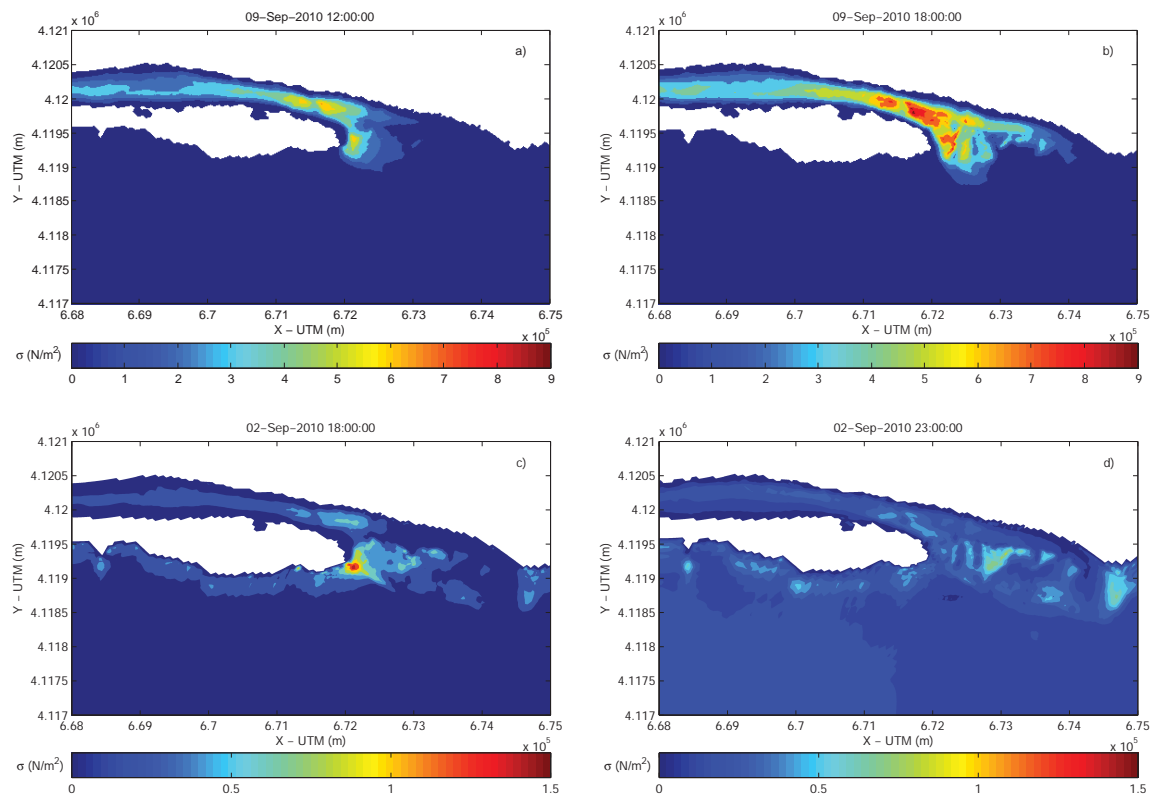


Figura 4.8: Máximo esfuerzo cortante en cuatro instantes de tiempo: a) Llenante y marea viva. b) Vaciante y marea viva. c) Llenante y marea muerta. d) Vaciante y marea muerta.

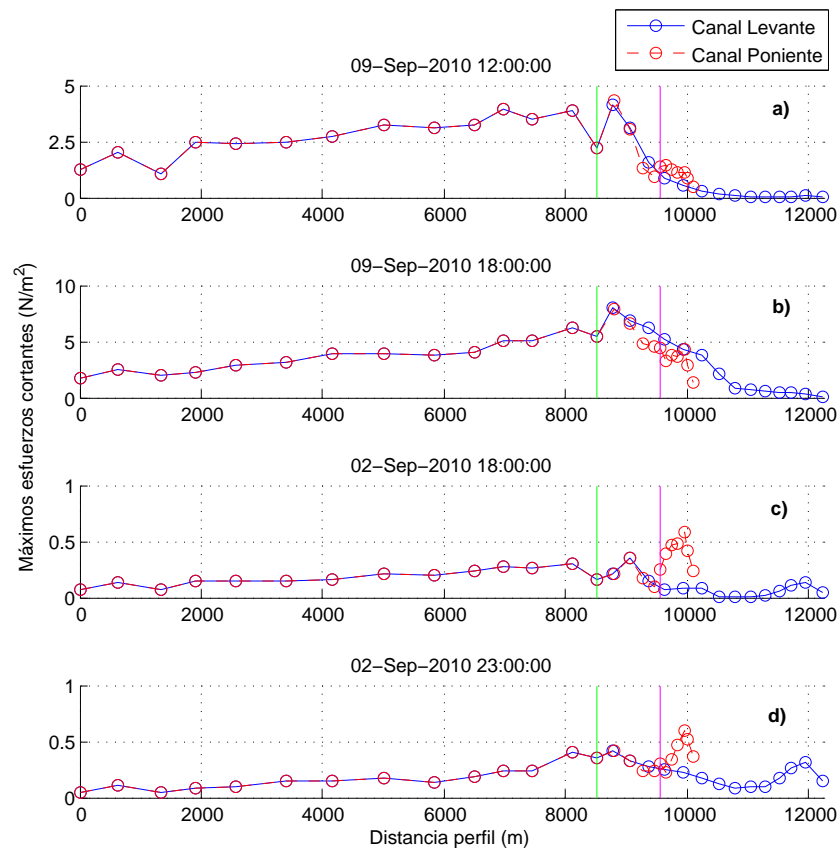


Figura 4.9: Variación del máximo esfuerzo cortante a lo largo de los canales de navegación en cuatro instantes de tiempo: a) Llenante y marea viva. b) Vaciante y marea viva. c) Llenante y marea muerta. d) Vaciante y marea muerta. La línea verde representa el punto de división de los canales de levante y poniente y la línea magenta el comienzo de la actuación de dragado en la canal de poniente. La distancia 0 m se corresponde con el punto más interno del río.

los esfuerzos cortantes son máximos, dándose en este caso en la zona de los bajos de la desembocadura. Es destacable la diferencia en los valores de los máximos esfuerzos cortantes entre la marea viva y la muerta, siendo prácticamente de un orden de magnitud.

El análisis de los paneles de la figura 4.8 permite deducir que las zonas potencialmente erosionables son el interior del río en la zona de la desembocadura, mientras que en las que predomina la sedimentación es la zona más este de la desembocadura donde se localiza la canal de navegación de levante.

#### 4.2.2. Correlaciones entre los agentes oleaje y viento con las variables hidrodinámicas

Con el fin de identificar correlaciones entre los principales agentes atmosféricos y los resultados del modelo se han representado en las figuras 4.10 y 4.11 las series de datos de determinados parámetros durante el periodo completo de simulación.

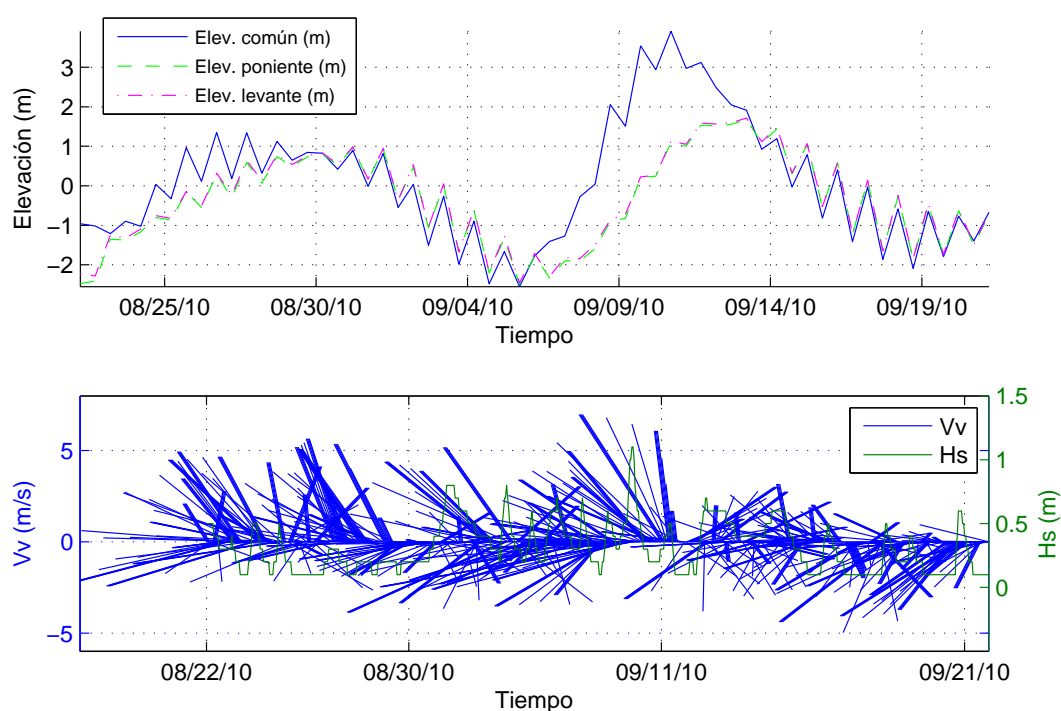


Figura 4.10: Correlación entre los agentes y nivel del agua.

En el panel superior se han dibujado los resultados del modelo que se pretenden relacionar, específicamente, el nivel del agua y la velocidad tangencial a la corriente, es decir, la componente de velocidad paralela a la dirección de la corriente, pues los valores son mayores. Se han seleccionado varios puntos en la zona de estudio, uno interior en el río y dos exteriores, uno al final de cada canal.

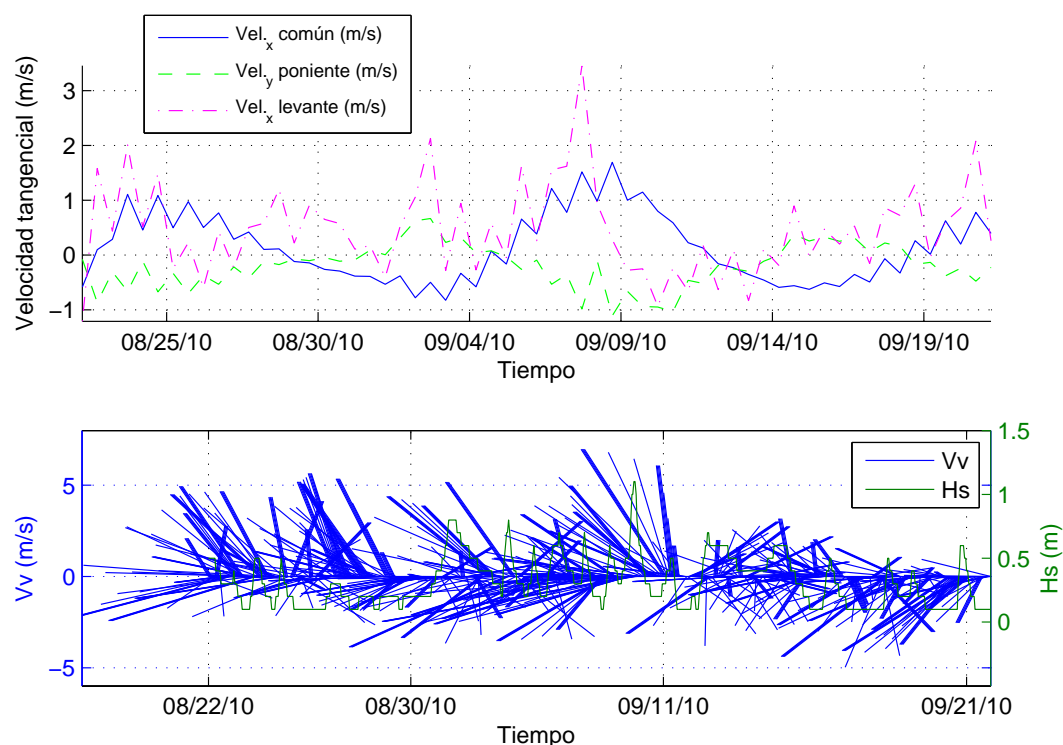


Figura 4.11: Correlación entre los agentes y velocidad de corriente.

En el panel inferior se han representado los datos del punto SIMAR (profundidades indefinidas) de altura de ola significativa y velocidad del viento, esquematizado este último de forma vectorial para que tenga influencia tanto el valor como la dirección.

Las gráficas aparentemente indican que los forzamientos de viento y oleaje aumentan la contribución de las asimetrías de las mareas. Cuando el viento sopla del NW es fuerte y está asociado con alturas de olas grandes y velocidades mayores. El principal efecto de las olas mayores es un aumento del nivel de agua y está asociada con velocidades de corriente elevadas.

### 4.2.3. Análisis de armónicos de la marea astronómica

El nivel de marea se puede definir como el nivel del mar sin tener en cuenta la acción del oleaje, y resultado al considerar la marea astronómica y la marea meteorológica. La marea meteorológica es de tipo aleatorio y se define como la oscilación del nivel del mar inducida por la acción de gradientes de presión atmosférica (marea barotrópica) o por la tensión tangencial del viento sobre la superficie de agua. La marea astronómica es de carácter determinista y se define como la oscilación periódica del nivel del mar inducida por fuerzas gravitacionales que actúan sobre las partículas de agua en la superficie de la Tierra.

El estudio de la marea astronómica puede abordarse desde tres puntos de vista:

- **Teoría de equilibrio** de Newton (1686) basado en las fuerzas generadoras de la marea.
- **Teoría dinámica** (Laplace, Bernouilli, Euler) consistente en la resolución de las ecuaciones fundamentales de la hidrodinámica.
- **Análisis armónico** basado en las componentes periódicas de la marea.

El análisis de armónicos es el método más práctico para el estudio de la marea astronómica. Se basa en el conocimiento de que la marea observada está formada por un número de componentes armónicos cuyos periodos han sido perfectamente establecidos y que coinciden con los periodos de algunos de los movimientos astronómicos relativos entre tierra-sol-luna.

La marea astronómica se aproxima por:

$$\xi_{MA}(t) = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \cos(\omega_i t + \alpha_i) \quad (4.1)$$

donde  $a_0$  es el nivel medio,  $a_i$  es la amplitud de la onda del componente  $i$ ,  $\omega_i$  es la frecuencia de la onda componente  $i$ ,  $\alpha_i$  es el desfase de la onda componente  $i$ ,  $t$  es el instante en el que se calcula la marea y  $N$  es el número de componente consideradas.

La distribución espacial de la amplitud y fase de cada armónico de marea proporciona información adicional sobre los procesos de transformación en el estuario. Estos procesos están influenciados principalmente por la anchura y cambios en la batimetría (Zarzuelo et al., 2016).

Para llevar a cabo este análisis de armónicos de marea astronómica se ha empleado la función de matlab "T-TIDE". Esta función requiere como parámetros de entrada la variación del nivel del mar en la zona de estudio y permite obtener una descomposición de la variación del nivel del mar en la componente armónica y la componente meteorológica, una descomposición de la marea astronómica en sus componentes armónicas y una selección de los armónicos principales.

Se ha aplicado esta función en todos los puntos de los canales que he definido (Figura 4.1), con la finalidad de visualizar la variación de la amplitud y fase a lo largo de los canales. Únicamente se han representado las componentes M2 y S2 porque son las más significativas.

Como era de esperar, la marea es semidiurna  $\frac{\eta_{K1} + \eta_{O1}}{\eta_{M2} + \eta_{S2}} \approx 0,09$ , con amplitudes entre 0.3 y 1.1 m. La marea astronómica se propaga desde mar abierto y conforme la onda de marea entra en el estuario la amplitud va aumentando debido a que el río es más estrecho en el interior que en la desembocadura. El punto de amplitud menor se corresponde con el punto en el que se dividen los canales de navegación de levante y poniente, que si lo localizamos en la figura 4.1, coincide con un ensanchamiento del río.

De acuerdo a la figura 4.12, la componente M2 alcanza su amplitud máxima en la zona más interna del estuario ( $a_{M2} \simeq 1,1 \pm 0,09m$ ) y la fase de esta componente aumentó



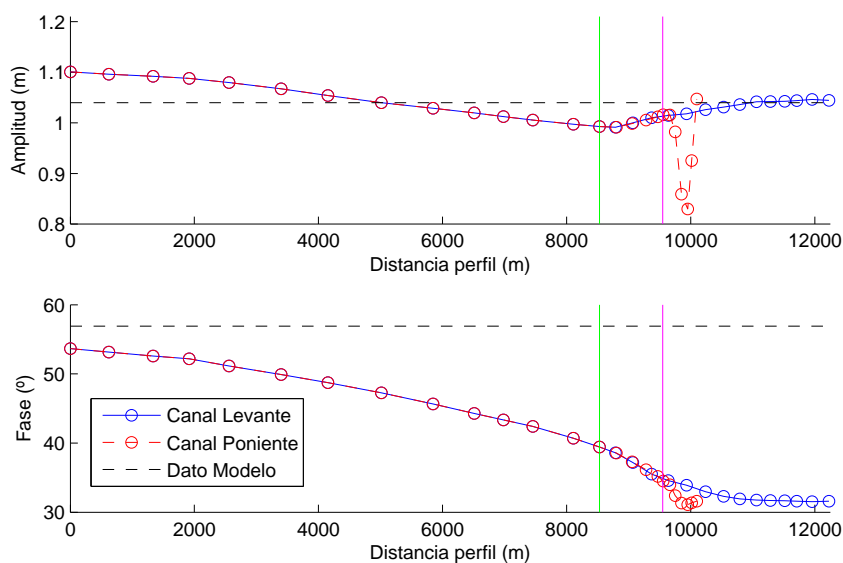


Figura 4.12: Evolución de la amplitud y fase del componente de marea M2 a lo largo de los canales de navegación. La línea verde representa el punto de división de los canales de levante y poniente y la línea magenta el comienzo de la actuación de dragado en la canal de poniente. La distancia 0 m se corresponde con el punto más interno del río.

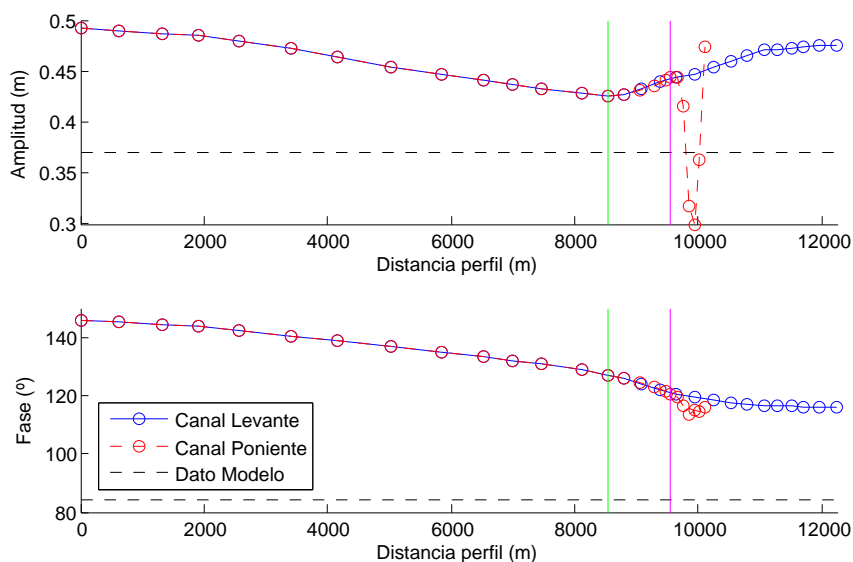


Figura 4.13: Evolución de la amplitud y fase del componente de marea S2 a lo largo de los canales de navegación. La línea verde representa el punto de división de los canales de levante y poniente y la línea magenta el comienzo de la actuación de dragado en la canal de poniente. La distancia 0 m se corresponde con el punto más interno del río.

aproximadamente  $25^\circ$  desde el exterior hacia el interior del estuario. Las variaciones de la fase proporcionan una idea de cómo de rápido se propaga esa componente de marea.

Comparando estas figuras con la que representa los máximos esfuerzos cortantes a lo largo de los canales (Figura 4.9), se concluye que la amplitud máxima se encuentra en áreas donde la fricción es moderada. Sin embargo, cuando la fricción es considerable, la amplitud de marea decrece rápidamente. En el proyecto Zarzuelo et al. (2016) se llevó a cabo un estudio similar para un estrechamiento en la Bahía de Cádiz y las variaciones en la amplitud se justificaron también por la dependencia de la fricción con la amplitud de la marea.

Según Prandle (2003), si la elevación de la amplitud de marea en el estuario  $\eta$  es  $\geq \frac{h}{10}$ , donde  $h$  es la profundidad media (4.3 m), la dinámica mareal es modificada por la fricción. En este caso,  $\eta \approx 1,03$  y  $h \approx 4,3m$  y la fricción juega un papel crucial en la dinámica mareal. Estas explicaciones justifican la disminución brusca de la amplitud que se produce en el final del canal de poniente, es decir, en la zona de la canal de acceso más angosta y con profundidad menor, por tanto, donde la fricción es considerable.

Conforme a la figura 4.13, la componente S2 alcanza su amplitud máxima también en la zona más interna del estuario ( $a_{S2} \approx 0,49 \pm 0,08m$ ). La fase de esta componente aumentó también aproximadamente  $25^\circ$  desde el exterior hacia el interior del estuario. Los resultados de las variaciones de amplitud y fase de la componente armónica S2 son similares a los resultados de la componente M2 en términos relativos, con variaciones de hasta el 10%.

#### 4.2.4. Elipses de marea en la zona de estudio

En las figuras 4.14 y 4.15 se muestran las elipses de marea de la componente de marea más energética, M2. Estas se definen por el semieje mayor  $M$ , semieje menor  $m$ , que indica si la corriente rota en sentido antihorario ( $m > 0$ ) o horario ( $m < 0$ ), y la inclinación  $\epsilon$ , que define la dirección de las corrientes.

Los valores máximos de  $M$  ( $\approx 0.9$  m/s) se localizan en el interior del río pero cerca de la desembocadura. En los canales, al principio de estos, más angostos, los valores de  $M$  son altos ( $\approx 0.5 - 0.9$  m/s), pero en su salida disminuyen bastante ( $\approx 0.2$  m/s). El semieje menor  $m$  muestra cambios en su signo en el exterior de los canales y, consecuentemente, la dirección de rotación de la corriente varía de sentido antihorario a horario. Las elipses en el tramo de río son mayormente rectilíneas, con semieje menor  $m$  insignificante ( $\leq 0.01$  m/s), mientras que en los canales, las elipses adquieren un poco de forma más redondeada y el semieje menor  $m$  supera 0.01 m/s.

Las elipses de la componente M2 muestran excentricidades (definidas como  $\sqrt{M^2 - m^2}/M$ ) mayores que 0.9, revelando una polarización lineal en todos los puntos, tal y como se esperaba en canales mareales angostos. En la zona de la desembocadura, sin embargo, el flujo comienza a tener más tendencia bidimensional.

La inclinación de las elipses están orientadas paralelas al eje longitudinal del río ( $\approx 4 - 15^\circ$  dirección E-W). Sin embargo, en los canales de acceso esta inclinación cambia

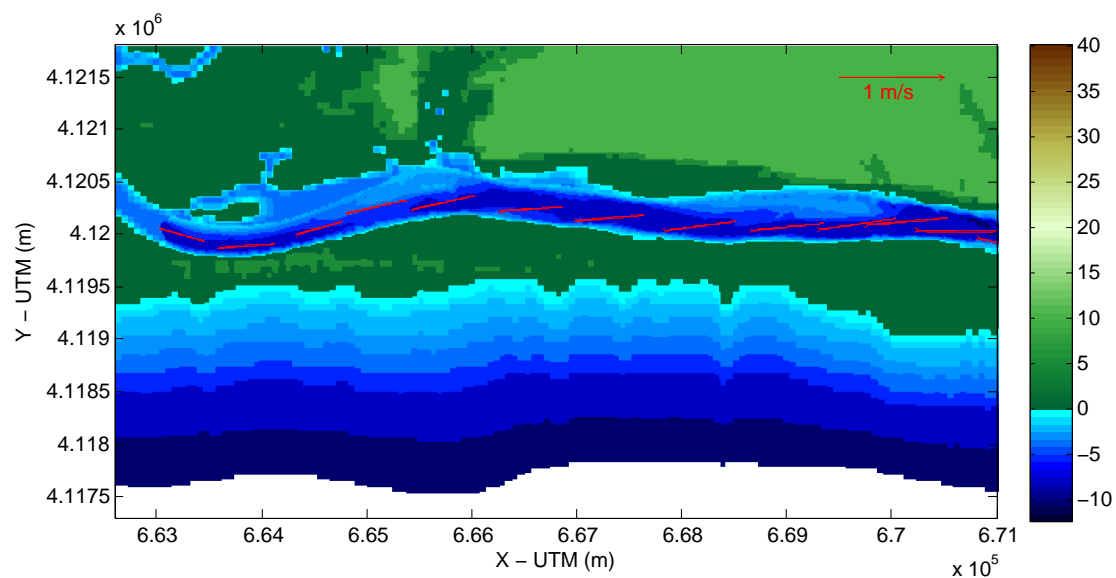


Figura 4.14: Elipses de marea de la componente M2 en el río.

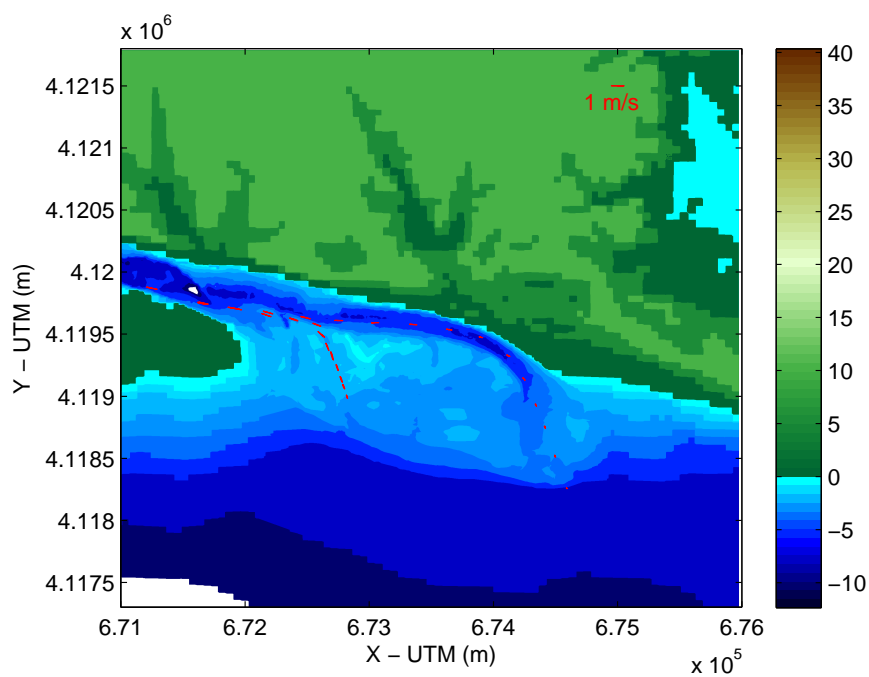


Figura 4.15: Elipses de marea de la componente M2 en la desembocadura.

y tienden a disponerse paralelo a los canales y varía aproximadamente desde  $15^\circ$  (dirección W-E) en los puntos cercanos a la desembocadura a  $70^\circ$  (dirección W-E) en los puntos localizados en el exterior de los canales.

#### 4.2.5. Prisma de marea

El prisma de marea se define como la cantidad de agua que fluye por un estuario entre la marea baja y la marea alta (Dean y Dalrymple, 2001). Para calcular el prisma de marea  $V(m^3)$  se ha seguido la formulación de De Jonge (1992), tal y como se indica en la ecuación 4.2.

$$V(t) = \int_{t=0}^{t=\tau} Q(t) dt \quad (4.2)$$

Donde  $t=0$  y  $t=\tau$  reproducen un periodo de 12 h (mareas semidiurnas) y  $Q(t)$  la tasa de transporte integrada en la sección ( $m^3 s^{-1}$ ). La tasa de transporte se calcula en una sección transversal al río, cercana a la desembocadura (Figura 4.16). El periodo de 12 horas se ha elegido tal que represente dos situaciones, marea viva y marea muerta para este estuario dominado por componentes mareales semidiurnas. En la figura 4.17 se ha representado la variación de la velocidad de corriente durante ambos periodos en los 8 puntos que definen la sección de cálculo.



Figura 4.16: Definición de la sección de cálculo del prisma de marea.

Aplicando la ecuación 4.2 se obtiene un valor de prisma de marea en el periodo de mareas vivas de  $4.9 Hm^3$ , reduciéndose a  $2 Hm^3$  durante mareas muertas. La comparación de estos valores con el caudal de entrada del río, prácticamente nulo, demuestra claramente el dominio mareal. Contrastando estos resultados con artículos anteriores, el orden de magnitud del volumen de prisma de marea es igual al resultado de Borrego et al. (1992) en la misma zona de estudio y que Zarzuelo et al. (2015) en la Bahía de Cádiz.

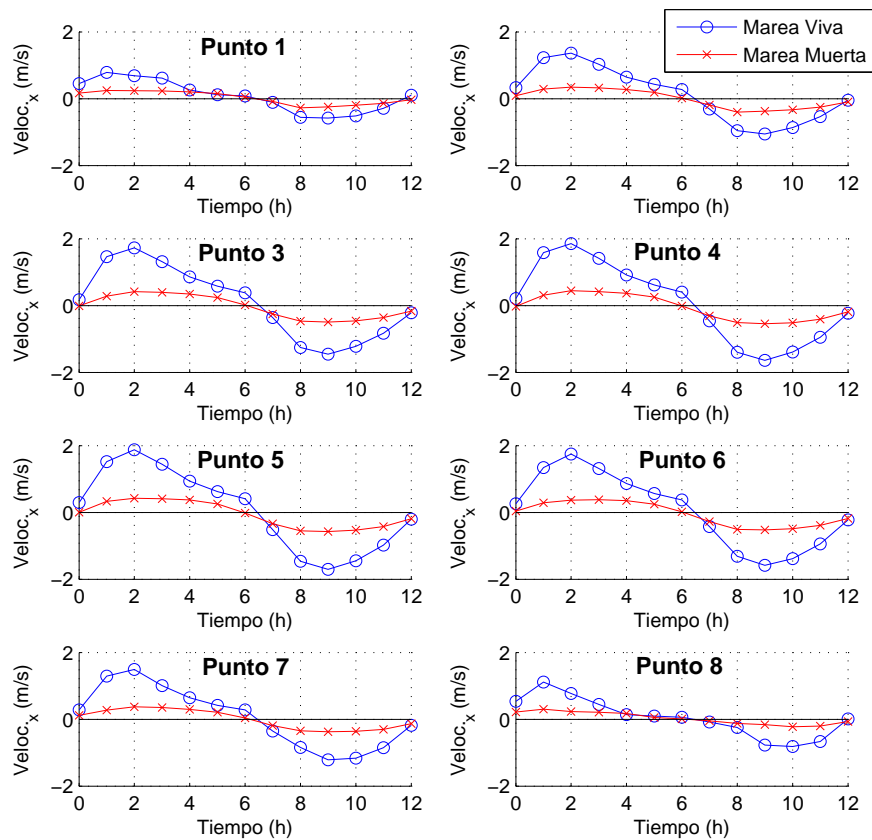


Figura 4.17: Variación de la velocidad frente al tiempo durante un periodo completo de onda y en 8 puntos que definen una sección transversal en el tramo final del río. En color azul se representa el periodo en marea viva, mientras que en color rojo se reproduce la marea muerta.

### 4.3. Resultados del Escenario II

Para evitar la repetición de resultados, únicamente se van a representar aquellas figuras en las que se aprecien las diferencias significativas entre los resultados de ambos escenarios. En el análisis de cada variable se examinará si la obra de dragado tiene alguna influencia y se cuantificará su variación relativa a la situación de partida (Escenario I).

El apartado referente a “Correlaciones entre los agentes oleaje y viento con las variables hidrodinámicas” no se ha vuelto a realizar pues no se considera trascendental en el estudio de la influencia o afección de la obra de dragado.

#### 4.3.1. Hidrodinámica en la zona de estudio

En este apartado no se representarán los mapas de variación de las variables, pues en estos apenas se aprecian las diferencias. Por supuesto, los instantes de representación son los mismos, pues son los más significantes para estudiar cada parámetro.

##### 4.3.1.1. Elevación del nivel del agua

En la figura 4.18 se observa que la variación del nivel del agua es muy similar en ambos escenarios, siguiendo en general la misma tendencia que en el Escenario I. Por ejemplo, se aprecia como en las fases de pleamar (paneles a) y c)) el nivel disminuye bruscamente al entrar al río desde las canales de acceso, mientras que en fases de bajamar no existe ese cambio brusco.

Comparando los resultados de ambos escenarios se observa que en el Escenario II en ningún punto ni instante de tiempo el nivel de agua es cero, lo que parece indicar que sí que es posible la navegación en las canales de acceso. En la situación más desfavorable para la navegación, panel b) (bajamar y marea viva), el nivel del agua sigue la misma tendencia que en el resto de situaciones y no el salto que se producía en el Escenario I porque en zonas de la canal de poniente la profundidad llegaba a ser nula.

En general, en el interior del río el nivel del mar en estas situaciones es prácticamente el mismo. Cuantificando los resultados se valora que en la mayoría de las situaciones las variaciones de nivel entre los resultados de ambos escenarios no son significativas, siendo del orden de milímetros (mm) o inferiores; excepto en el estado de bajamar con marea viva (panel b) que son de 2 - 5 cm en el interior del río, suponiendo unas variaciones relativas a la situación de partida del 3%.

##### 4.3.1.2. Profundidad

La figura 4.19 es muy importante y permite determinar las diferencias más notables entre ambos escenarios, es decir, la profundidad del lecho. En los resultados del Escenario II, a lo largo de las posibles rutas de navegación, se percibe que en todas las fases de la marea la profundidad es superior a 1 m en todos los puntos, mostrando, por tanto, la efectividad la obra de dragado realizada, habiendo cumplido su objetivo principal de conseguir condiciones de calado mínimo de 1 m.

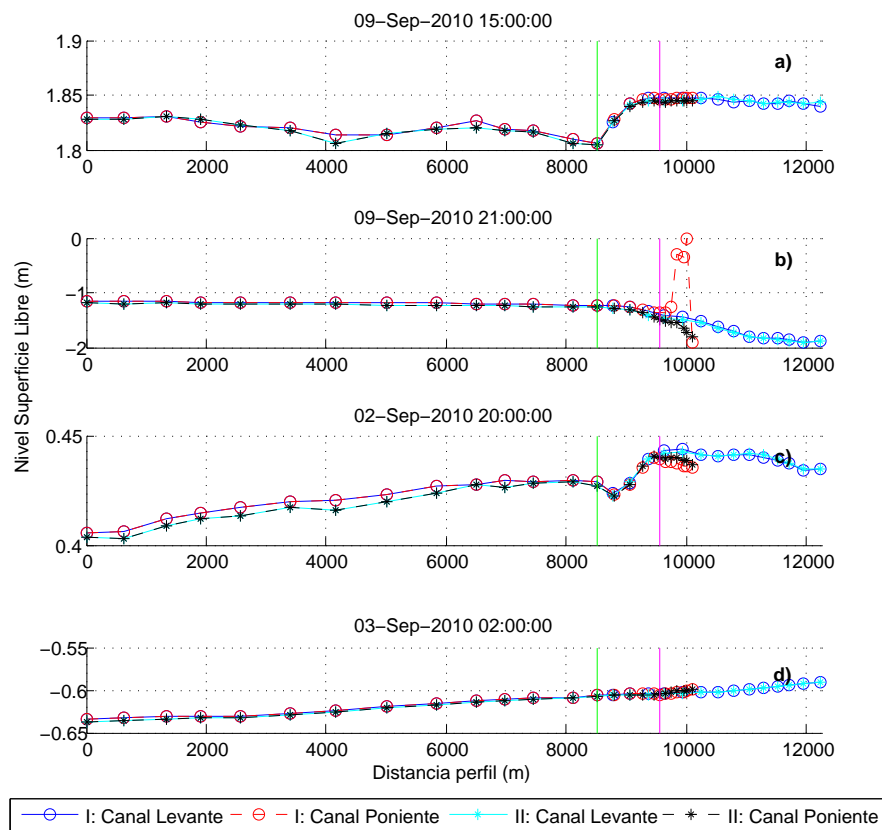


Figura 4.18: Variación de la elevación del nivel a lo largo de los canales de navegación tras la obra de dragado en cuatro instantes de tiempo: a) Pleamar y marea viva. b) Bajamar y marea viva. c) Pleamar y marea muerta. d) Bajamar y marea muerta. La línea verde representa el punto de división de los canales de levante y poniente y la línea magenta el comienzo de la actuación de dragado en la canal de poniente. La distancia 0 m se corresponde con el punto más interno del río.

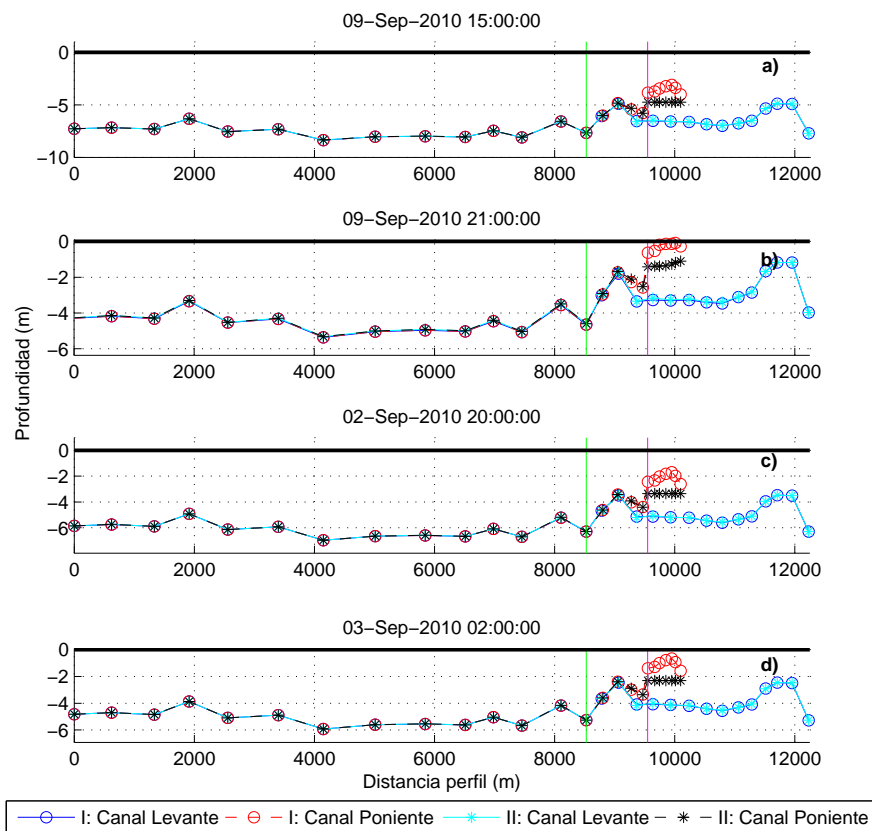


Figura 4.19: Variación de la profundidad a lo largo de los canales de navegación tras la obra de dragado en cuatro instantes de tiempo: a) Pleamar y marea viva. b) Bajamar y marea viva. c) Pleamar y marea muerta. d) Bajamar y marea muerta. La línea verde representa el apunto de división de las canales de levante y poniente y la línea magenta el comienzo de la actuación de dragado en el canal de poniente. La distancia 0 m se corresponde con el punto más interno del río.



Sin embargo, la influencia de esta obra de dragado en la profundidad del lecho se produce principalmente en la zona dragada, no implicando grandes diferencias en la profundidad en el resto de puntos entre las situaciones anteriores y posterior al dragado (del orden de milímetros, por tanto, despreciables). En la zona dragada en la canal de poniente, señalado su inicio con la línea de color magenta, la profundidad cambia en el Escenario II valores entre 1 y 1.6 m.

En estados de pleamar y marea viva (panel a)) la profundidad del lecho es en la mayor parte del canal de navegación superior a 7 m, excepto en zonas de las canales de acceso de poniente y levante que se reduce a 5 m. En la situación contraria, bajamar y marea viva (panel b)), la profundidad en el interior del río tiene valores en torno a 4 y 5 m, excepto en la canal de acceso de poniente que se reduce de a 1 m aproximadamente, valores de un orden superior a la profundidad en la situación de partida, 10 cm; y en la canal de levante la profundidad no ha variado en los diferentes escenarios y se mantiene 2 – 3 m. En las etapas de marea muerta (paneles c) y d)) la carrera de marea es menor y la profundidad en el canal de navegación por el río es 5 – 6 m y en las canales de acceso se reduce en la pleamar a 3 m (en la situación de partida inferior a 2 m) y en la bajamar a 2 m aproximadamente (en la situación de partida alrededor de 1 m).

#### 4.3.1.3. Velocidad de corriente

En la figura 4.20 se observa como los principales cambios como consecuencia de la obra de dragado se producen cuando la marea es vaciante, tanto con mareas vivas como muertas. En el panel b), representativo del estado de marea vaciante y marea viva, los mayores cambios se aprecian en la canal de poniente (hasta variaciones de 1 m/s en la velocidad en dirección x), sin embargo, en la canal de levante también se aprecian variaciones aunque pequeñas (del orden de centésimas de m/s). En el estado de marea vaciante y marea muerta la obra de dragado tiene influencia únicamente en la canal de poniente y estas variaciones son inferiores, del orden de centésimas de m/s.

#### 4.3.1.4. Máximo esfuerzo cortante

Con la obra de dragado se consigue aumentar la profundidad del lecho en una zona de la canal de poniente, teniendo también como consecuencia una disminución de los máximos esfuerzos cortantes en dicha zona. Como se puede observar en la figura 4.21, la obra de dragado tiene mayor influencia en los máximos esfuerzos cortantes en la canal de poniente en situaciones de marea muerta, no suponiendo diferencias significativas en el resto de la zona de estudio.

Como ya se mencionó al analizar los resultados del Escenario I, en la figura 4.21 destaca la diferencia de orden de magnitud en los máximos esfuerzos cortantes entre las mareas vivas y muertas. En estados de marea viva, tanto pleamar como bajamar, los máximos esfuerzos cortantes en el Escenario II varían respecto los del Escenario I del orden de décimas de  $N/m^2$ , que teniendo en cuenta el orden de magnitud de estos, la variación relativa es pequeña ( $\approx 10\%$ ) y, por tanto, la influencia de la obra de dragado es reducida. Sin embargo, con marea muerta, en el interior del río las variaciones entre escenarios del máximo esfuerzo cortante son similares, del orden de décimas de  $N/m^2$ ,

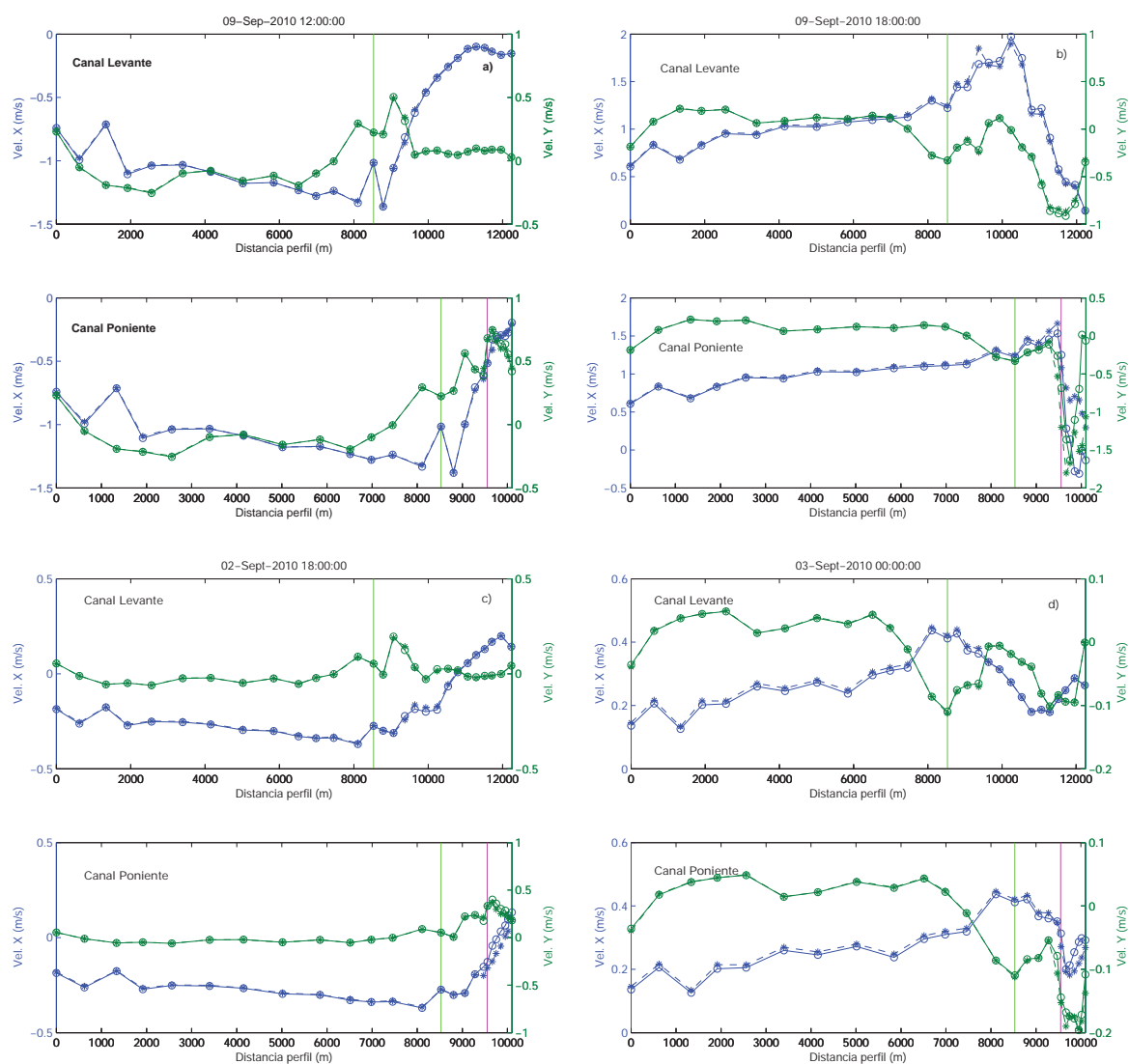


Figura 4.20: Variación de la velocidad de corriente a lo largo del canal de navegación tras la obra de dragado en cuatro instantes de tiempo: a) Llenante y marea viva. b) Vaciante y marea viva. c) Llenante y marea muerta. d) Vaciante y marea muerta. La línea verde representa el punto de división de los canales de levante y poniente y la línea magenta el comienzo de la actuación de dragado en la canal de poniente. La distancia 0 m se corresponde con el punto más interno del río.

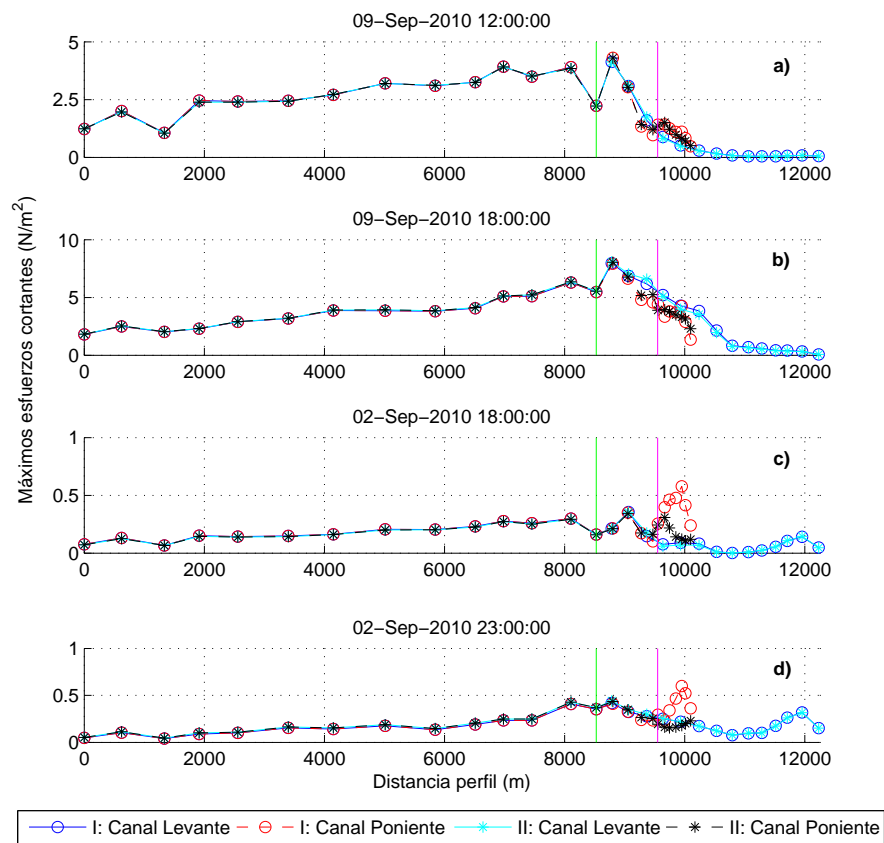


Figura 4.21: Variación del máximo esfuerzo cortante a lo largo del canal de navegación tras la obra de dragado en cuatro instantes de tiempo: a) Llenante y marea viva. b) Vaciante y marea viva. c) Llenante y marea muerta. d) Vaciante y marea muerta. La línea verde representa el punto de división de los canales de levante y poniente y la línea magenta el comienzo de la actuación de dragado en la canal de poniente. La distancia 0 m se corresponde con el punto más interno del río.

pero en la zona dragada estas variaciones llegan a ser del orden de  $0.5 \text{ N/m}^2$ . Teniendo en cuenta el orden de magnitud de la variable en estos estados, se cuantifica la variación relativa (entre el 35 - 70 %) y se concluye que la obra de dragado sí implica grandes cambios en la zona dragada respecto a la situación de partida.

#### 4.3.2. Análisis de armónicos de la marea astronómica

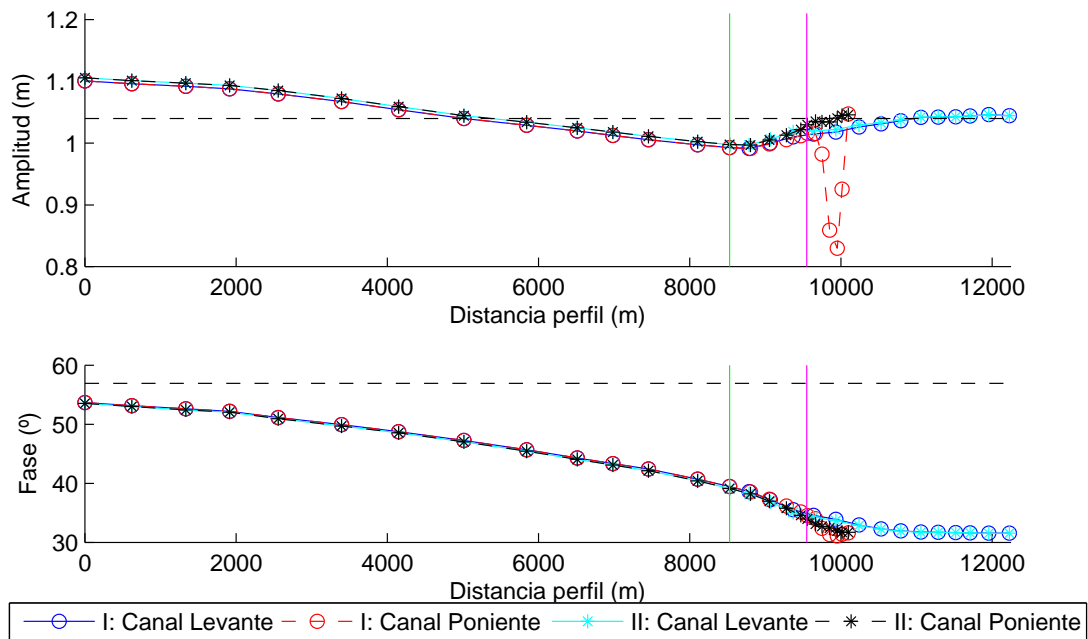


Figura 4.22: Evolución de la amplitud y fase del componente de marea M2 a lo largo de los canales de navegación tras la obra de dragado. La línea verde representa el punto de división de los canales de levante y poniente y la línea magenta el comienzo de la actuación de dragado en la canal de poniente. La distancia 0 m se corresponde con el punto más interno del río.

En general, la tendencia de variación de la amplitud y fase de las componentes armónicas principales es la misma. Sin embargo, en las figuras 4.22 y 4.23 destaca que, como consecuencia de la obra de dragado (resultados del Escenario II), en el canal de poniente la amplitud no sufre esa disminución brusca, lo que puede estar motivado porque los esfuerzos cortantes también son menores y la profundidad mayor.

Como se explicó anteriormente, de acuerdo a Prandle (2003) y Zarzuelo et al. (2016), uno de los factores que causan disminuciones bruscas en la amplitud de marea es la fricción. Los valores elevados de máximo esfuerzo cortante así como la escasez de profundidad sirvieron de base para justificar la disminución brusca de la amplitud de marea que se da en el Escenario I en la canal de poniente. Sin embargo, en los resultados ya analizados del Escenario II se ha analizado que los máximos esfuerzos cortantes en esa zona disminuyen notablemente y la profundidad aumenta también con una variación relativa significativa, por ello, es posible concluir que las variaciones en estas dos variables, entre otros factores, pueden ser los causantes principales de que en el Escenario II la amplitud de marea no sufra ese cambio, sino que siga una tendencia.

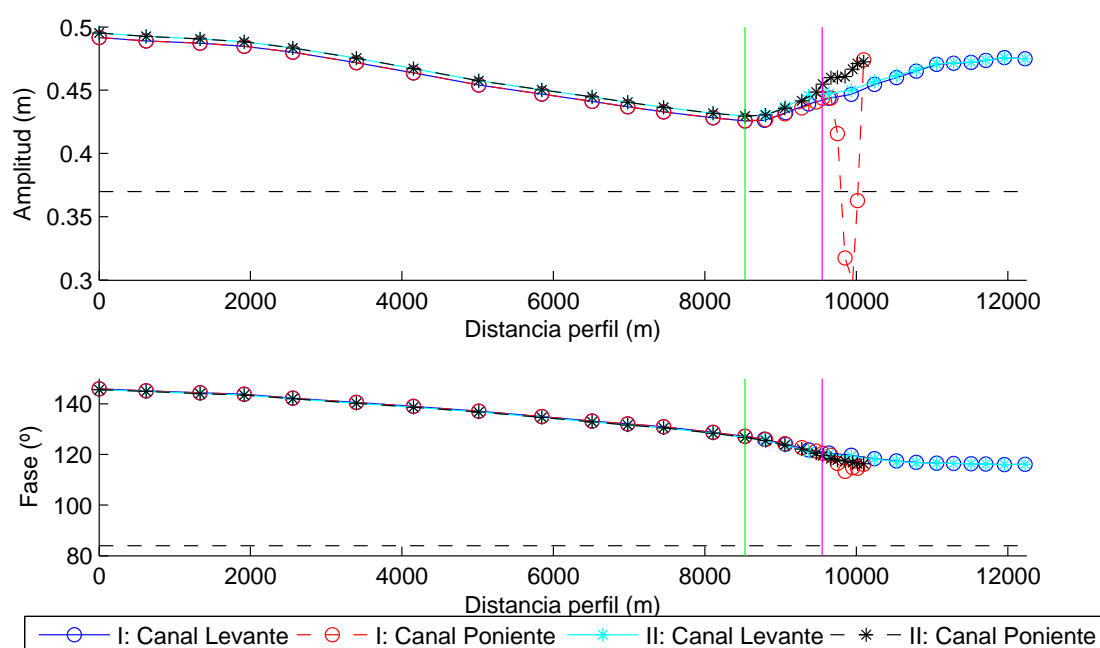


Figura 4.23: Evolución de la amplitud y fase del componente de marea S2 a lo largo de los canales de navegación tras la obra de dragado. La línea verde representa el punto de división de los canales de levante y poniente y la línea magenta el comienzo de la actuación de dragado en la canal de poniente. La distancia 0 m se corresponde con el punto más interno del río.

Si cuantificamos las variaciones existentes entre los resultados de los Escenarios I y II se concluye que el dragado no afecta a la variación de la fase de los principales armónicos de marea, mientras que en la amplitud, aunque sigue la misma tendencia, los valores son levemente superiores. En los puntos más externos que se localizan en el mar el valor de la amplitud no ha sufrido variaciones, pero a medida que nos adentramos en el río el aumento de amplitud en el Escenario II respecto al Escenario I es mayor. Sin embargo, estas elevaciones son del orden de milímetros y las variaciones relativas no llegan a ser del 1 %.

### 4.3.3. Elipses de marea en la zona de estudio

En las figuras 4.24 y 4.25 no se aprecian las diferencias existentes en las elipses de marea representativas del Escenario I y del Escenario II, y es que estas son insignificantes. Tanto las excentricidades como los semiejes sufren variaciones inferiores al 1 %.

### 4.3.4. Prisma de marea

El prisma de marea en mareas vivas aumenta de  $4.9$  a  $5.2 \text{ H m}^3$ , es decir, aumenta un 6 % respecto al escenario de partida; y en el caso de mareas muertas aumenta  $4 \cdot 10^4 \text{ m}^3$ , que se corresponde con un 2 %.

En el análisis de resultados del Escenario I se citaron otros trabajos y estuarios en los que el prisma de marea es del mismo orden, como por ejemplo la Bahía de Cádiz. En

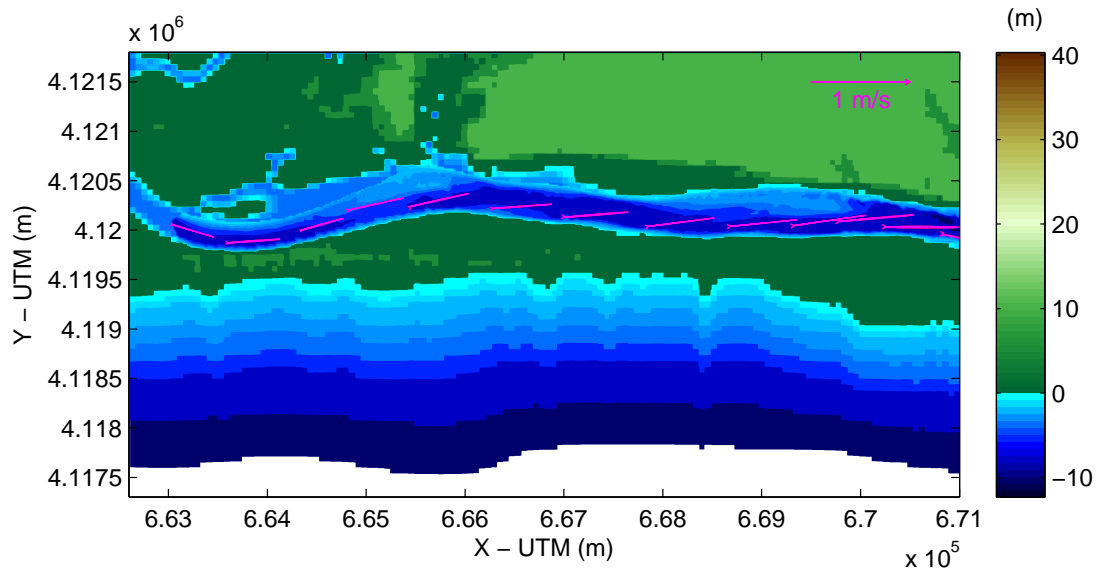


Figura 4.24: Elipses de marea tras la obra de dragado de la componente M2 en el río. En color rojo se han representado las elipses características del Escenario I y en color magenta las del Escenario II.

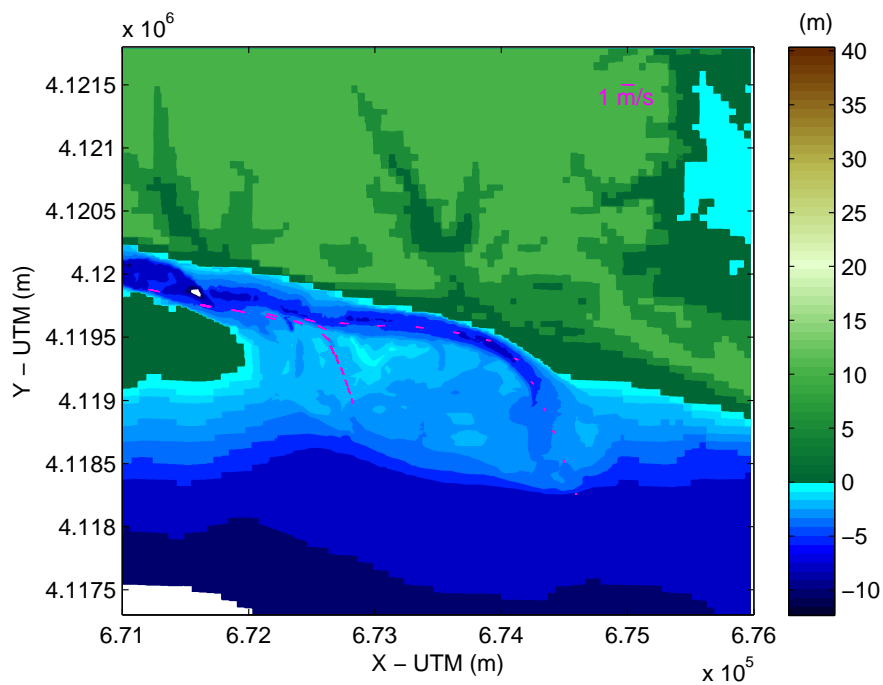


Figura 4.25: Elipses de marea tras la obra de dragado de la componente M2 en la desembocadura. En color rojo se han representado las elipses características del Escenario I y en color magenta las del Escenario II.

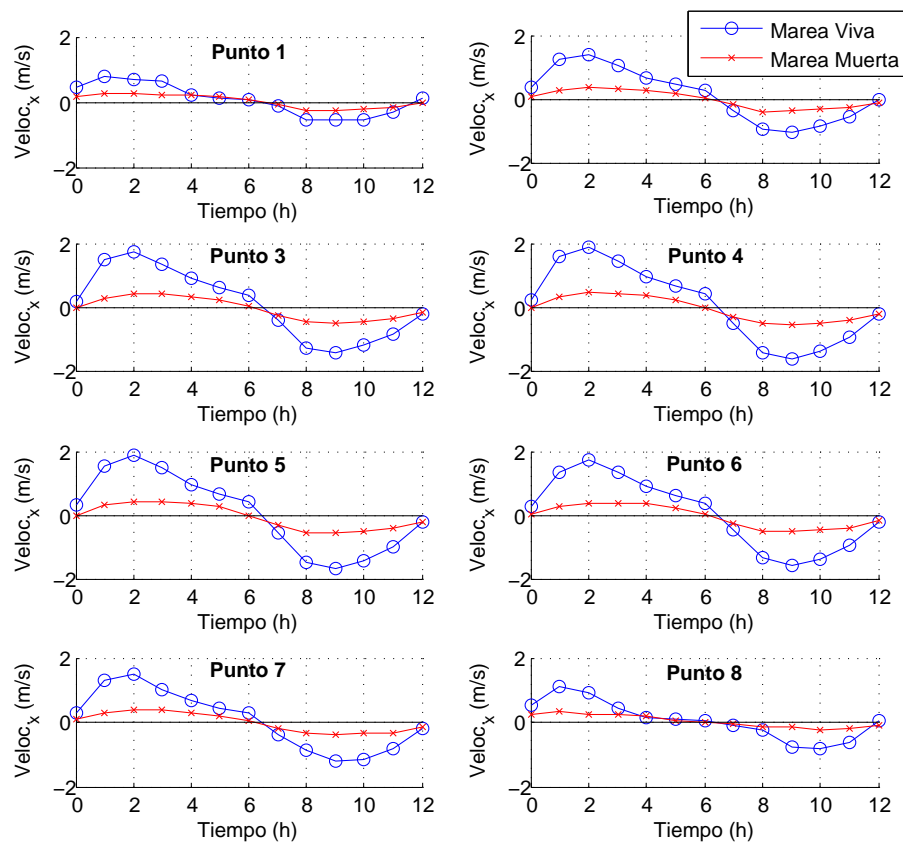


Figura 4.26: Variación de la velocidad frente al tiempo tras la obra de dragado durante un periodo completo de onda y en 8 puntos que definen una sección transversal en el tramo final del río. En color azul se representa el periodo en marea viva, mientras que en color rojo se reproduce la marea muerta.

este estuario, del río Piedras, un valor alto de prisma de marea es más necesario que en la Bahía de Cádiz ya que el caudal del río Piedras es prácticamente nulo debido a las presas construidas en su cauce y en la zona de estudio se localiza el Paraje Natural Marismas del Río Piedras y Flecha del Rompido.



---

## Capítulo 5

# Conclusiones

---

Este Trabajo Fin de Máster se ha centrado en la caracterización hidrodinámica del estuario del río Piedras y en el análisis de la afección de una obra de dragado en esta, mediante modelo numérico. El modelo hidrodinámico que se ha implementado y validado ha sido el Delft3D (módulos WAVE y FLOW). Las principales conclusiones son:

- La dirección de procedencia del oleaje más frecuente es SW, con alturas de olas entre 0 y 4.5 m y periodos pico entre 2 y 21 s, siendo más frecuentes las alturas de ola inferiores a 0.5 m y los periodos pico entre 4 y 6 s. Las direcciones de procedencia del viento más frecuentes son NNW y SW, con rango de velocidades de viento entre 0 y 20 m/s y más frecuentes entre 2 y 4 m/s.
- El sistema es mesomareal y semidiurno, con carrera de marea media de 2 m, oscilando entre 4 m durante mareas vivas y 1 m durante mareas muertas. Las amplitudes de los armónicos astronómicos principales, M2 y S2, varían entre 0.3 m y 1.1 m. La marea astronómica se propaga desde mar abierto y conforme la onda de marea entra en el estuario la amplitud va aumentando. De acuerdo a Prandle (2003) y Zarzuelo et al. (2016), la amplitud máxima se localiza en áreas donde la fricción es moderada, y viceversa. En la situación de partida, a su paso por el canal de poniente la amplitud se reduce bruscamente debido a que en esta zona la fricción es significativa y la profundidad escasa, sin embargo, con la obra de dragado, este cambio brusco no se produce, sino que la variación de la amplitud sigue una tendencia.
- La marea tiene influencia en toda la zona de estudio, inundando una amplia zona de marismas y caños aguas arriba de la desembocadura, concretamente hasta la presa de los Machos (localizada 24 *km* aguas arriba de la desembocadura).
- En situaciones de bajamar, en la situación de partida, la profundidad es insuficiente para la navegabilidad de la canal de acceso de poniente, sin embargo, con la obra de dragado se mejoran las condiciones de calado, superando en todos los instantes 1 m, en contraste, con la situación de partida en la que existían zonas en las que con determinadas condiciones la profundidad era cero. En general la profundidad ha aumentado en la zona dragada entre 1 - 1.7 m. Pero la obra de dragado no solo ha afectado a la delimitación de la obra, sino que en el interior del río ha aumentado también levemente. Por ejemplo, en condiciones de baja-

mar con marea viva la profundidad ha aumentado 2 - 5 cm, es decir, variaciones del 3 %.

- La obra de dragado en la canal de poniente no tiene solo implicaciones en la profundidad, sino que, por ejemplo, como consecuencia de esta y el aumento de la profundidad conseguido, los máximos esfuerzos cortantes se reducen notablemente en esta zona. En condiciones de mareas muertas, que son las situaciones en los que la profundidad ha experimentado variaciones relativas mayores, los máximos esfuerzos cortantes se reducen entre un 35 y 70 %.
- Se ha analizado como en condiciones de mareas vivas y tormentas las velocidades en las canales de acceso de la desembocadura son elevadas,  $\approx 2$  m/s. Sin embargo, en esta zona dominan las condiciones medias de oleaje y viento tendiendo a cerrar la desembocadura. Esto supone que a pesar de los valores altos de velocidad en condiciones de marea no existe un equilibrio en las canales de acceso y es necesario un dragado periódico.
- Los semiejes y la excentricidad de las elipses de marea no han experimentado variaciones significativas como consecuencia de la obra de dragado. Los valores máximos del semieje  $M$  ( $\approx 0.9$  m/s) se localizan en el interior del río pero cerca de la desembocadura. En los canales, al principio de estos, más angostos, los valores de  $M$  son altos ( $\approx 0.5 - 0.9$  m/s), pero en su salida disminuyen bastante ( $\approx 0.2$  m/s). Sin embargo, los valores del semieje  $m$  son insignificantes, superando el valor de 0.01 m/s únicamente en las canales de acceso. Las elipses de la componente  $M_2$  y  $S_2$  muestran excentricidades mayores que 0.9, es decir, en canales angostos dominados por la marea el flujo tiende a comportarse unidimensional, pero en las canales de acceso tiene un poco de tendencia a flujo bidimensional.
- El prisma de marea en la situación de partida es en condiciones de marea viva  $4.9 \text{ Hm}^3$ , aumentando con el dragado un 6 %, y con marea muerta  $2 \text{ Hm}^3$ , aumentando en el Escenario II un 2 %. El valor de prisma de marea es un factor primordial en cuestiones ambientales, y más en este estuario en el que las descargas del río son nulas por las presas que se localizan aguas arriba y se localiza en el Paraje Natural Marismas del Río Piedras y Flecha del Rompido. La tasa de renovación del estuario es pobre de acuerdo con Zarzuelo et al. (2015), sin embargo, el agua está en continuo movimiento y no estancada.

---

## Capítulo 6

# Futuras líneas de trabajo

---

En lo que concierne a las futuras líneas de investigación, durante el proceso de elaboración de este trabajo se han considerado los temas que se exponen a continuación.

En primer lugar, resultaría muy útil la validación del modelo con otros periodos de tiempo y campañas de datos. Como se ha mencionado anteriormente en el trabajo, este no cuenta con financiación por lo que se ha partido de los datos de partida disponibles tras una amplia búsqueda. Sin embargo, debido a las importantes conclusiones que han sido posibles de obtener con este trabajo y la fuerte implicación que tendría en los futuros estudios que se realicen en la zona de estudio, se considera interesante repetir el trabajo pero ya no desde este punto de vista didáctico, sino, realizando previamente mediciones propias de batimetría y campaña de datos.

En la actualidad existen problemas para balizar las canales de acceso debido a la intensa dinámica sedimentaria que sufren los bajos de la desembocadura, sometidos a corrientes de marea intensas y a oleajes exteriores elevados. Durante la ejecución de la obra de dragado en 2010, también la alta dinámica sedimentaria característica de la desembocadura, desencadenó en varios contratiempos e inconvenientes pues el canal dragado se desplazaba a razón de 30 m diarios. Por ello, considero que sería conveniente analizar la morfodinámica de la zona de estudio incluyendo el módulo de transporte de sedimentos del modelo Delft3D. Este permitirá determinar la evolución que sufre una obra de dragado, pues permite tener en cuenta la variación del fondo por procesos de erosión y sedimentación.

Por otra parte, el estudio puede avanzar en torno a no centrarse principalmente en la desembocadura del río, sino realizar también un estudio detallado de las zonas de caños mareales y marismas que hay en el interior del estuario. Esta extensión puede ser valiosa para comprobar los argumentos de bibliografías de que la marea tiene influencia hasta justo donde se encuentra la presa de los machos y, además, conocer la cota de inundación en diferentes condiciones pues esta zona de marismas forma parte del Paraje Natural Marismas del Río Piedras y Flecha del Rompido, en el que destaca la riqueza de su flora y su fauna.



---

## Apéndice A

# Clima marítimo

---

### A.1. Datos para el estudio del clima marítimo de la zona de estudio

Los datos empleados para el estudio del clima marítimo en la costa de El Rompido son los del punto SIMAR 5029023 de Puertos del Estado. Su localización puede verse en la figura A.1.



Figura A.1: Localización del punto SIMAR empleado.

A continuación se analiza para el oleaje y para el viento:

- Descripción general en profundidades indefinidas.
- Régimen medio.
- Régimen extremal.

## A.2. Oleaje

### A.2.1. Descripción general del oleaje en profundidades indefinidas

En primer lugar se realiza una descripción general de las características del oleaje en profundidades indefinidas en la zona de estudio, en el que se mostrará:

- Serie temporal de las alturas de ola significativa  $H_s$  desde 1958 hasta 2016 (Figura A.2).
- Tres histogramas y tablas que los discretizan, uno por cada variable:  $H_s$ ,  $T_p$  y  $\theta$  (Figuras A.3, A.4 y A.5).
- Tres gráficos de dispersión entre las variables  $H_s$ ,  $T_p$  y  $\theta$ . El primero representa la altura de ola respecto al periodo pico (Figura A.6); el segundo, el periodo pico respecto a la dirección de procedencia (Figura A.7); y el tercero, la altura de ola respecto a la dirección de procedencia (Figura A.8).
- Rosa de oleaje (Figura A.9).

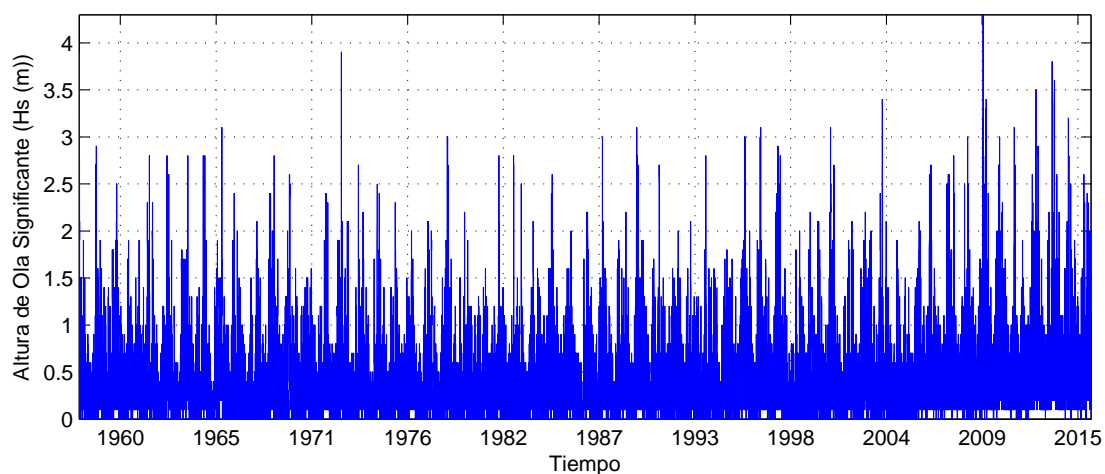


Figura A.2: Serie temporal de altura de ola significativa.

Hs (m)	Fr (%)
0 – 0.25	58.121
0.25 – 0.5	22.822
0.5 – 0.75	7.880
0.75 – 1	5.940
1 – 1.25	2.101
1.25 – 1.5	1.596
1.5 – 1.75	0.519
1.75 – 2	0.511
2 – 2.25	0.190
2.25 – 2.5	0.173
2.5 – 2.75	0.074
2.75 – 3	0.054
3 – 3.25	0.008
3.25 – 3.5	0.004
3.5 – 3.75	0.002
3.75 – 4	0.002
4.25 – 4.5	0.000

Tabla A.1: Porcentaje de alturas de ola.

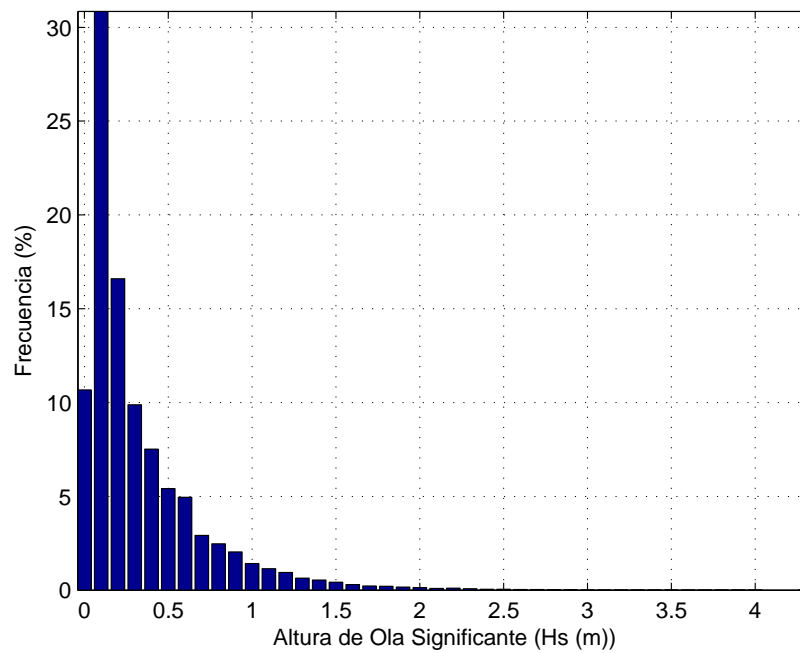


Figura A.3: Histograma de alturas de ola.

Tp (s)	Fr (%)
0 – 1	0.000
1 – 2	0.000
2 – 3	1.206
3 – 4	9.549
4 – 5	23.568
5 – 6	13.681
6 – 7	8.501
7 – 8	6.729
8 – 9	5.148
9 – 10	6.713
10 – 11	10.131
11 – 12	6.763
12 – 13	2.201
13 – 14	2.039
14 – 15	1.573
15 – 16	0.777
16 – 17	0.395
17 – 18	0.171
18 – 19	0.057
19 – 20	0.017
20 – 21	0.003

Tabla A.2: Porcentaje de periodos pico.



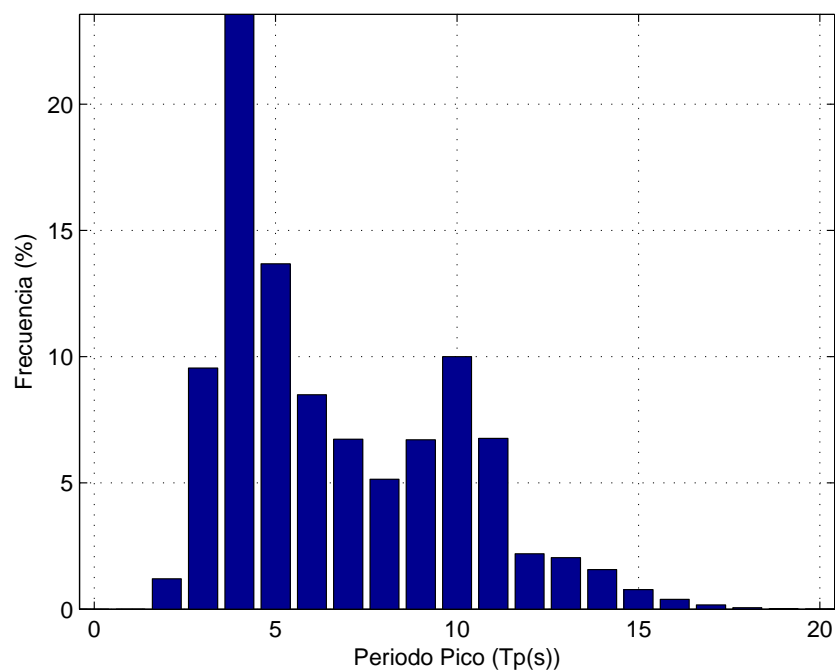


Figura A.4: Histograma de periodos pico.

$\theta$ (°)	Fr (%)
N	0.000
NNE	0.025
NE	0.015
ENE	0.022
E	0.046
ESE	0.174
SE	0.442
SSE	22.043
S	5.347
SSW	11.577
SW	42.570
WSW	16.408
W	0.569
WNW	0.258
NW	0.289
NNW	0.164

Tabla A.3: Porcentaje de direcciones media de procedencia.

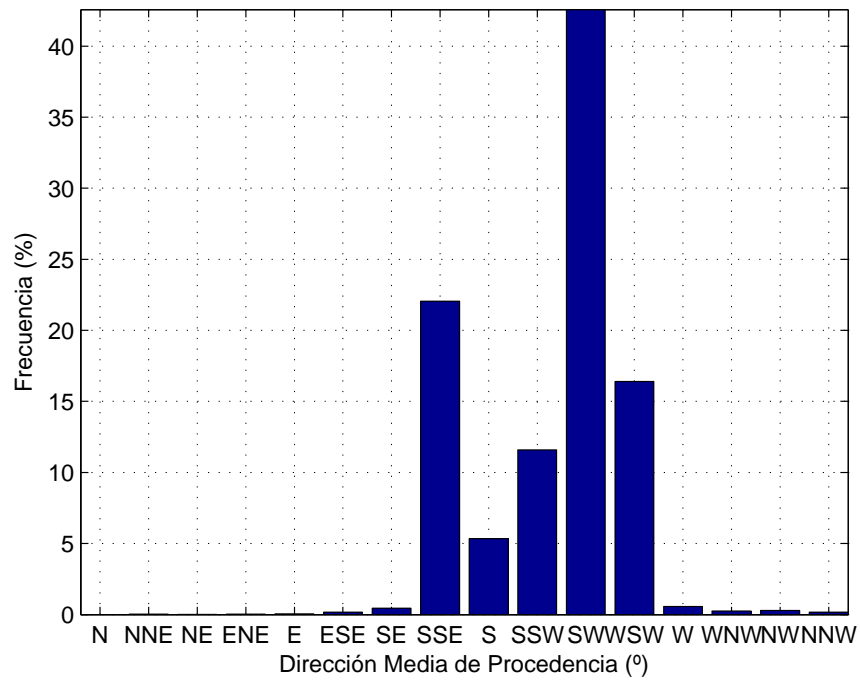


Figura A.5: Histograma de direcciones media de procedencia.

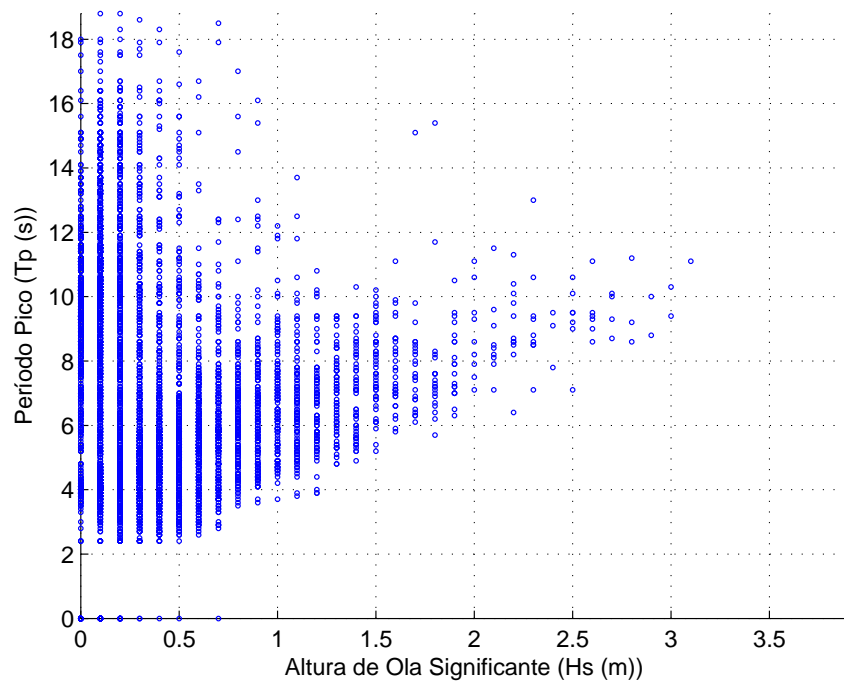


Figura A.6: Gráfico de dispersión  $H_s - T_p$ .

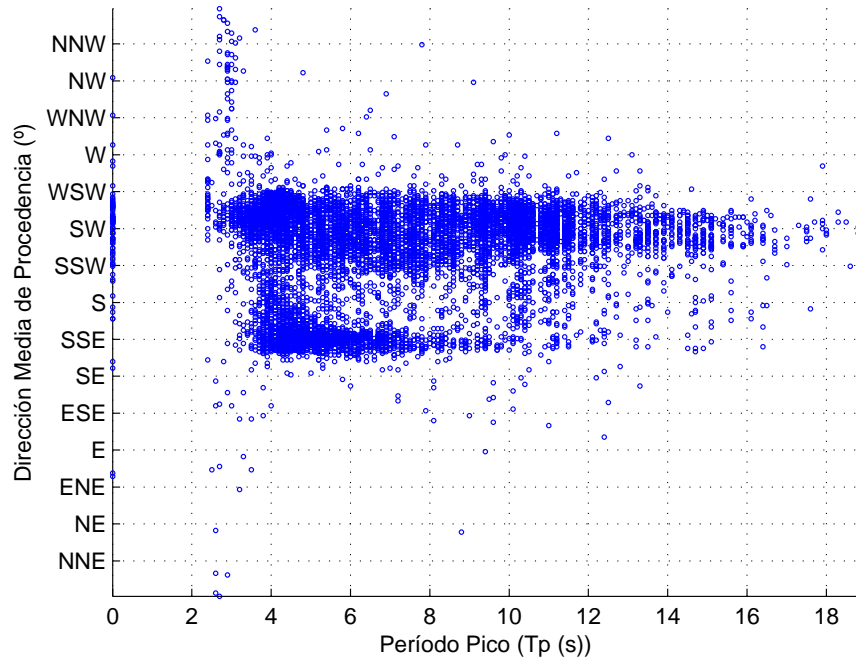


Figura A.7: Gráfico de dispersión  $T_p - \theta$ .

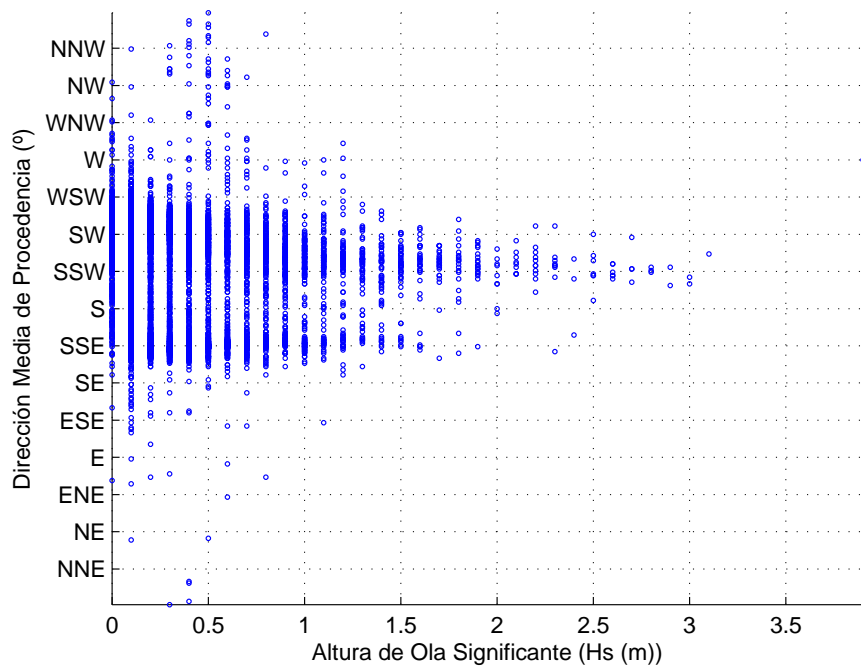


Figura A.8: Gráfico de dispersión  $H_s - \theta$ .

Se presenta a continuación la rosa de oleaje de los datos del punto SIMAR.

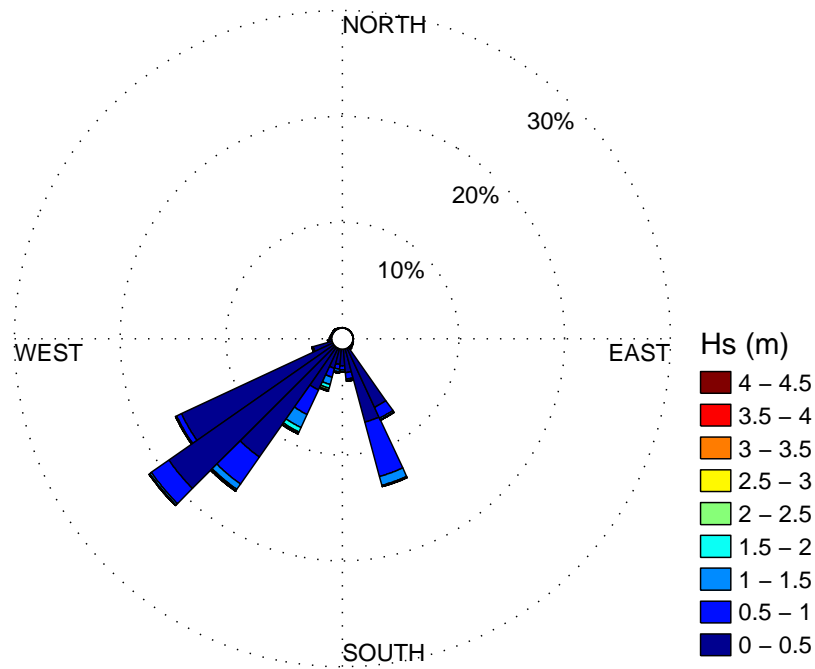


Figura A.9: Rosa de oleaje.

### Resumen de resultados parciales

Los resultados más reseñables de la descripción general del oleaje en profundidades indefinidas son:

- Rango de alturas de ola entre 0 y 4.5 m.
- Las alturas de ola más frecuentes están entre 0.1 y 0.5 m.
- Rango de periodos pico entre 2 y 21 s.
- Los periodos pico más frecuentes están entre 4 y 6 s.
- La dirección de procedencia del oleaje más frecuente es SW.

### A.2.2. Régimen medio de $H_s$ en profundidades indefinidas

Se obtiene el régimen medio del oleaje en profundidades indefinidas para la “Altura de ola significativa  $H_s$  (m)” considerando todas las direcciones.

Todos los regímenes medios de altura de ola significativa se ajustan a una distribución de probabilidad tipo Weibull cuya función de densidad viene representada por:

$$y = f(x|a, b) = b a^{-b} x^{b-1} e^{-(x/a)^b} I_{(0, \infty)}(x) \quad (\text{A.1})$$

En la tabla A.4 se muestran los parámetros de ajuste del régimen medio de altura de ola significativa obtenidos según la distribución de Weibull.

Parámetros:	a	b
	0.3917	1.1544

Tabla A.4: Parámetros de la distribución tipo Weibull para el régimen medio de altura de ola.

Una vez conocidos estos parámetros se calculan las funciones de densidad y distribución de probabilidad. En la figura A.10 se representa el histograma de frecuencias (datos reales) junto con la función de densidad de los datos ajustados según una distribución de Weibull (datos empíricos); esta gráfica permite conocer la probabilidad de ocurrencia de cada altura de ola. En la figura A.11 se encuentra representado el histograma de frecuencias acumuladas junto con la función de distribución que indica la probabilidad de no excedencia de cada altura de ola, es decir, la probabilidad de que dicha altura de ola no sea superada.

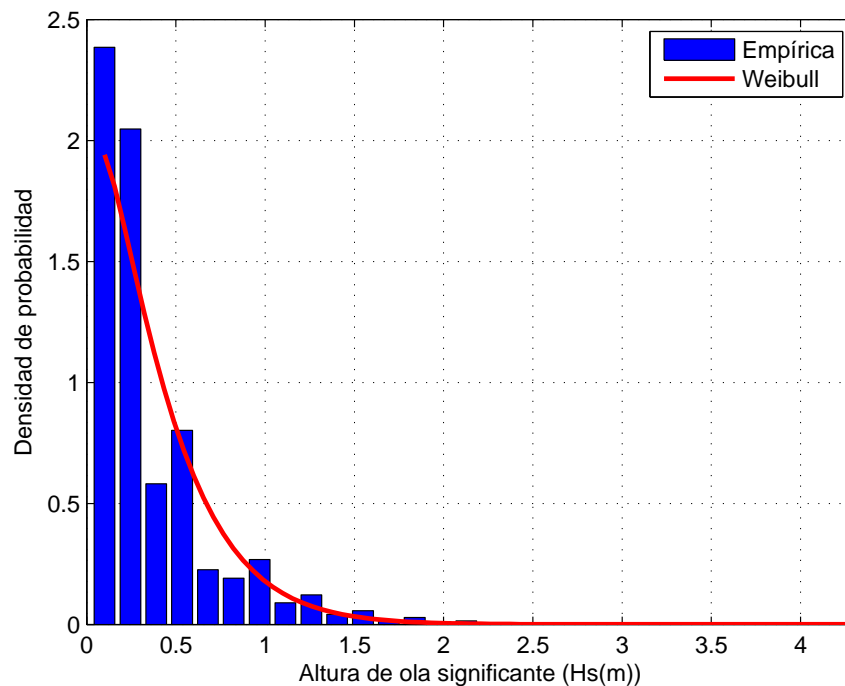


Figura A.10: Función de densidad tipo Weibull para el régimen medio de altura de ola.

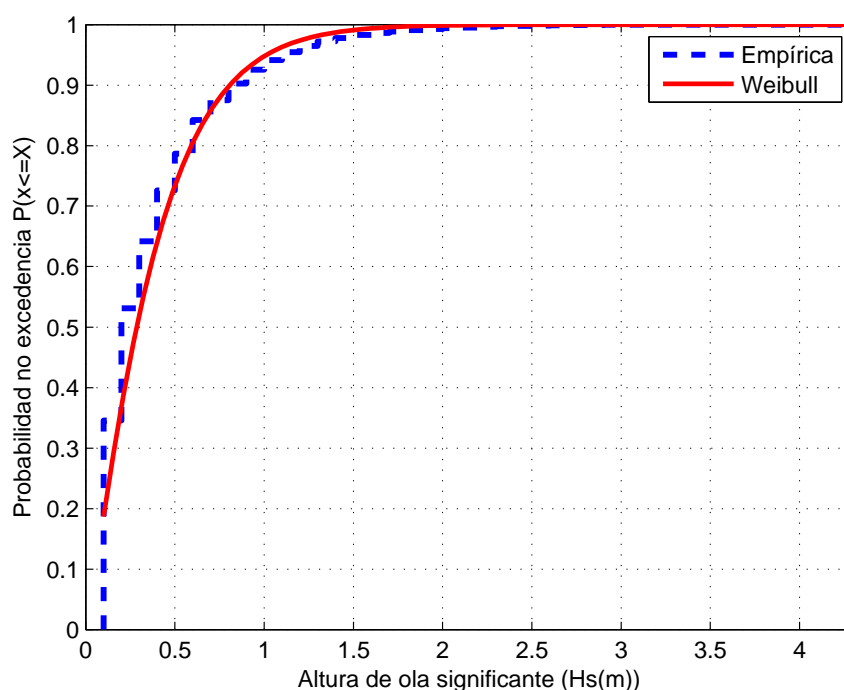


Figura A.11: Función de distribución tipo Weibull para el régimen medio de altura de ola.

### Resumen de resultados parciales

Como resumen del régimen medio para la altura de ola se presenta la tabla A.5.

Prob. No excedencia	Altura de ola (Hs(m))
50 %	0.3
85 %	0.7

Tabla A.5: Tabla resumen del régimen medio para la altura de ola.

### A.2.3. Régimen extremal de $H_s$ en profundidades indefinidas

Para la obtención del régimen extremal se ha usado el método de Picos Sobre Umbral (POT, Peaks Over Threshold). Para ello se ha fijado la altura de ola umbral en 1.5 m, correspondiente al valor que es superado en menos del 1 %. Para garantizar la independencia estadística entre temporales, se ha supuesto que la duración mínima entre temporales debe ser superior a 48 horas. De esta manera se han obtenido 538 eventos extremos respectivamente, en los 57 años meteorológicos analizados.

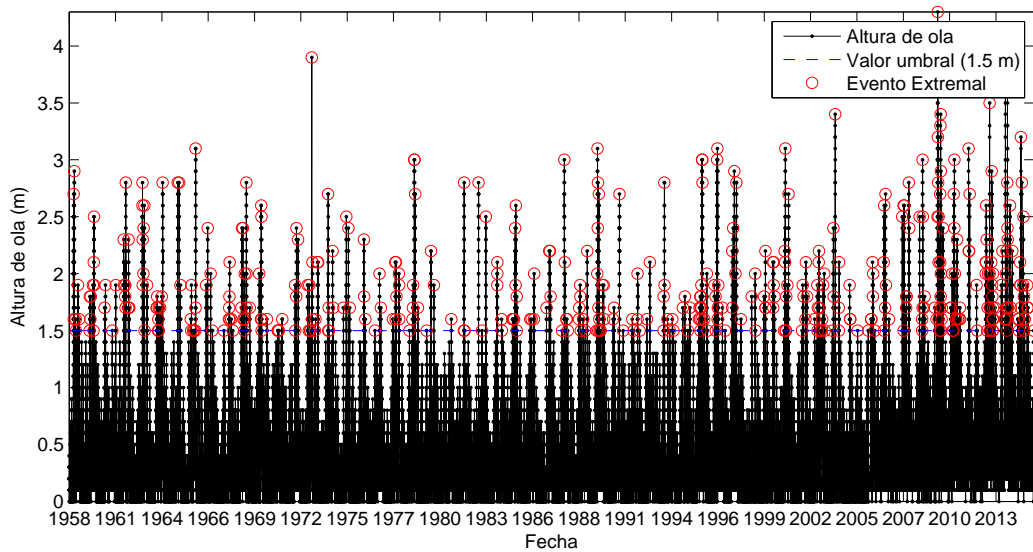


Figura A.12: Picos de altura de ola sobre umbral con  $H_{su} = 1,5m$ .

Para caracterizar el régimen de picos sobre umbral, se utiliza la distribución de Valores Extremos Generalizada representativa del régimen. La forma general de la distribución utilizada es:

$$y = f(x|k, \mu, \sigma) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \exp\left(-\left(1 + k \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{k}}\right) \left(1 + k \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-1 - \frac{1}{k}} \quad (\text{A.2})$$

La distribución generalizada de los Valores Extremos (GEV) une a las distribuciones de tipo I (Gumbel), tipo II (Frechet) y tipo III (Weibull) en una sola familia para permitir un rango continuo de posibles ajustes. Esta distribución posee unos parámetros de localización y escala,  $\mu$  y  $\sigma$ , y un parámetro de forma  $k$ . De esta manera, cuando  $k < 0$ , el GEV es equivalente al valor de tipo III (Weibull); cuando  $k > 0$ , es equivalente a la de tipo II (Frechet); y en el límite cuando  $k = 0$ , se convierte en el tipo I (Gumbel).

En la tabla A.6 se muestran los parámetros de ajuste del régimen extremal de altura de ola significativa obtenidos según la distribución de Valores Extremos Generalizada.

$k$	$\sigma$	$\mu$	Distribución equivalente	Número de eventos
0.7330	0.1946	1.6414	Frechet	538

Tabla A.6: Parámetros de la distribución tipo GEV para el régimen extremal de altura de ola.

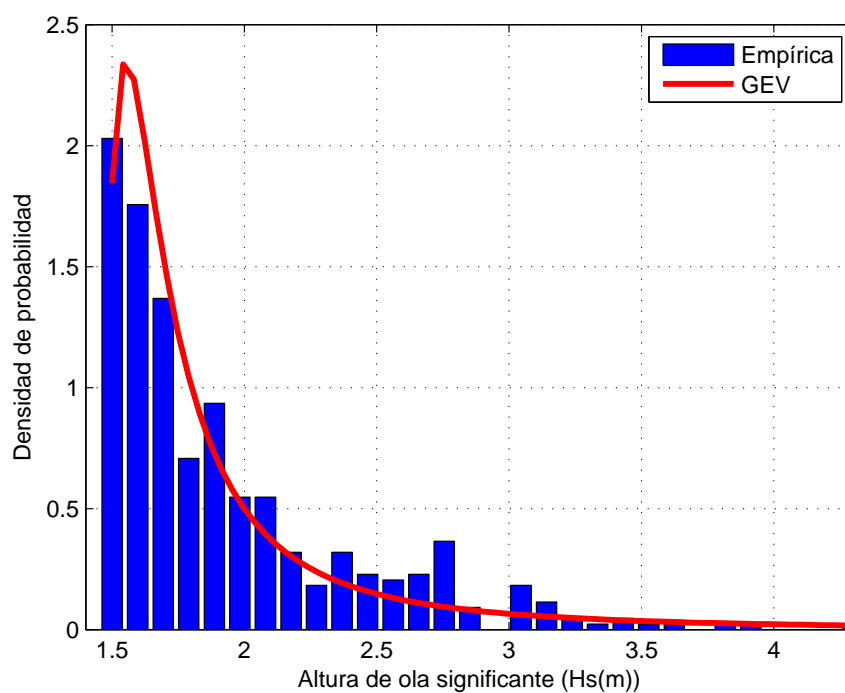


Figura A.13: Función de densidad tipo GEV para el régimen extremal de altura de ola.

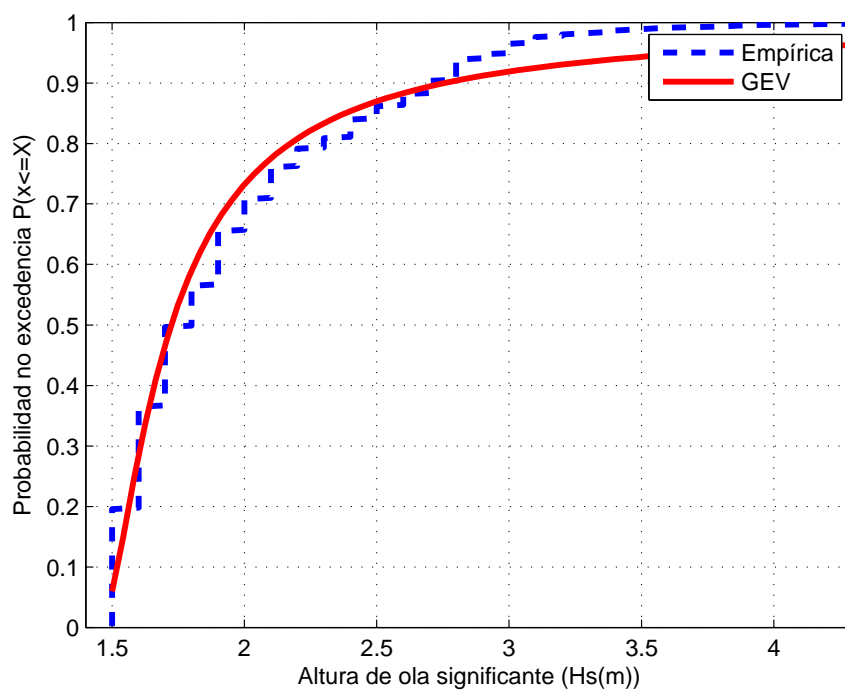


Figura A.14: Función de distribución tipo GEV para el régimen extremal de altura de ola.



### Resumen de resultados parciales

Como resumen del régimen extremal para la altura de ola se presenta la siguiente tabla:

Prob. No excedencia	Altura de ola ( $H_s(m)$ )
50 %	1.7
85 %	2.5

Tabla A.7: Tabla resumen del régimen extremal para la altura de ola.

## A.3. Viento

### A.3.1. Descripción general del viento en profundidades indefinidas

En primer lugar se realiza una descripción general de las características del viento en profundidades indefinidas en la zona de estudio, en el que se mostrará:

- Serie temporal de la velocidad del viento desde 1958 hasta 2016 (Figura A.15).
- Dos histogramas y tablas que los discretizan, uno por cada variable:  $V_v$  y  $\theta_v$  (Figuras A.16 y A.17).
- Un gráfico de dispersión entre las variables  $V_v$  y  $\theta_v$  (Figura A.18).
- Rosa de los vientos (Figura A.19).

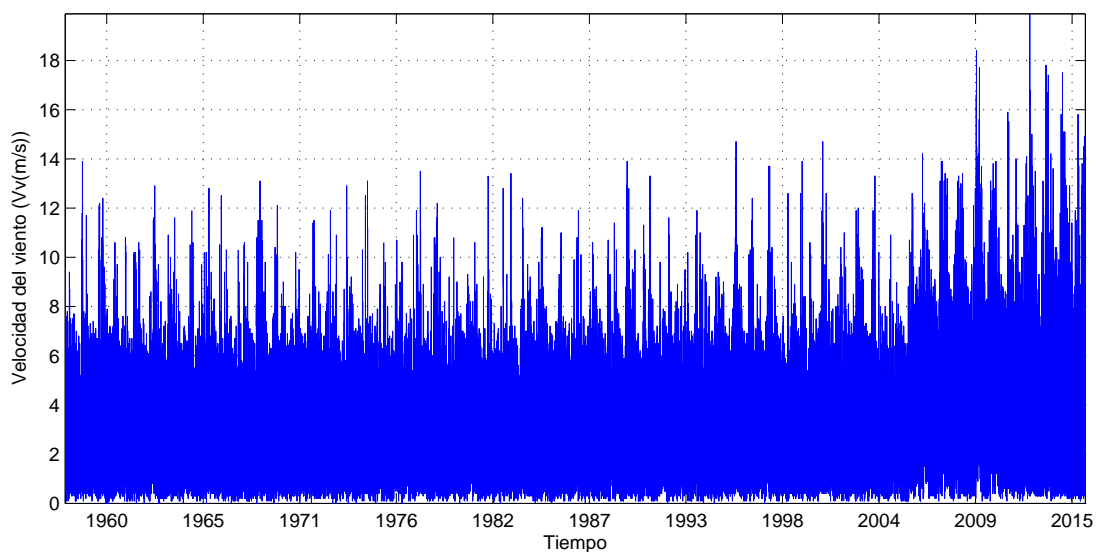


Figura A.15: Serie temporal de velocidades de viento.

Vv (m/s)	Fr (%)
0 – 1	4.816
1 – 2	13.637
2 – 3	20.239
3 – 4	23.984
4 – 5	17.851
5 – 6	9.853
6 – 7	4.784
7 – 8	2.286
8 – 9	1.165
9 – 10	0.632
10 – 11	0.358
11 – 12	0.203
12 – 13	0.102
13 – 14	0.055
14 – 15	0.015
15 – 16	0.009
16 – 17	0.004
17 – 18	0.002
18 – 19	0.001
19 – 20	0.001

Tabla A.8: Porcentaje de velocidades de viento.

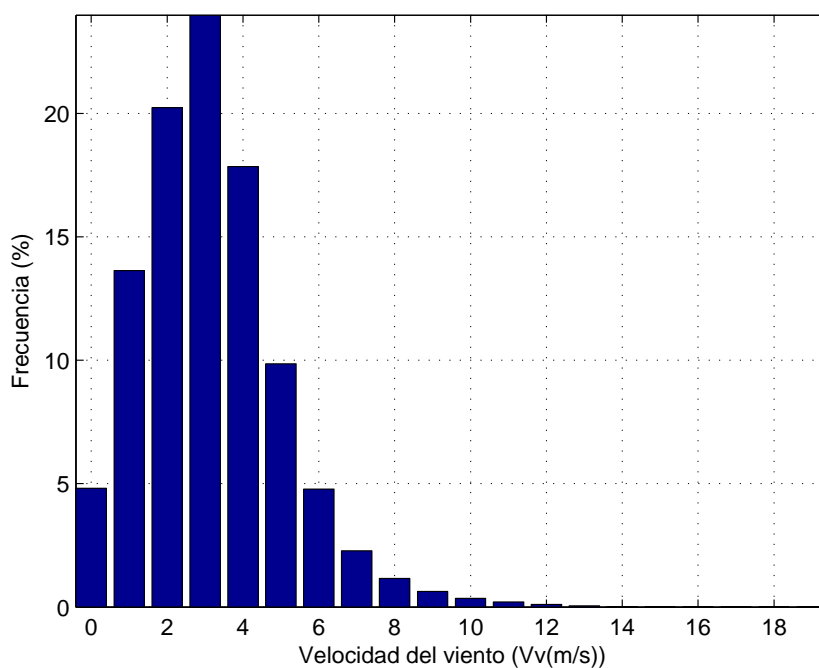


Figura A.16: Histograma de velocidades de viento.

Hs (m)	Fr (%)
N	0.000
NNE	3.964
NE	5.281
ENE	6.766
E	5.072
ESE	3.909
SE	3.609
SSE	3.027
S	3.986
SSW	6.073
SW	9.635
WSW	8.597
W	6.599
WNW	6.200
NW	9.365
NNW	11.928

Tabla A.9: Porcentaje de velocidades de viento.

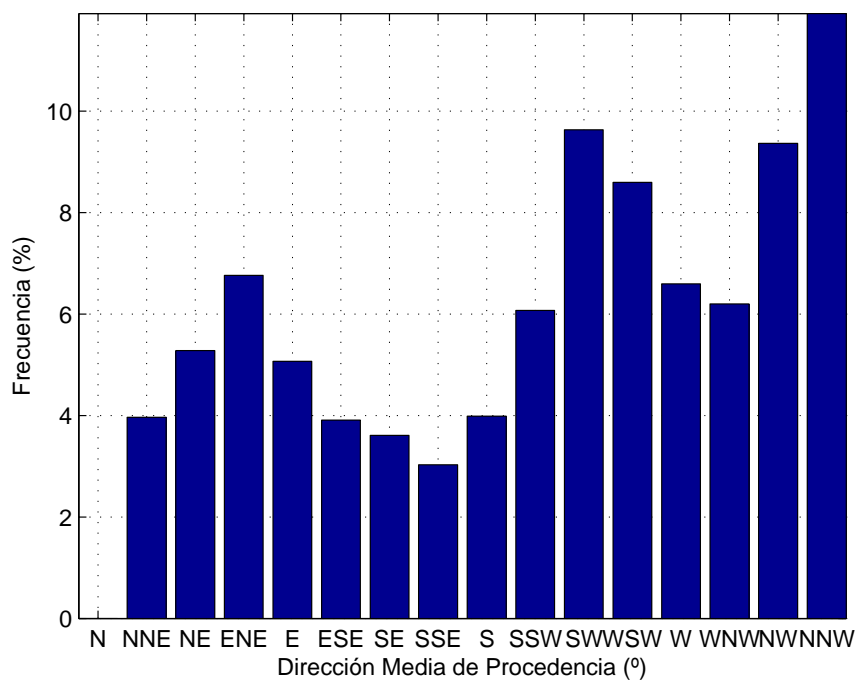


Figura A.17: Histograma de direcciones medias de procedencia.

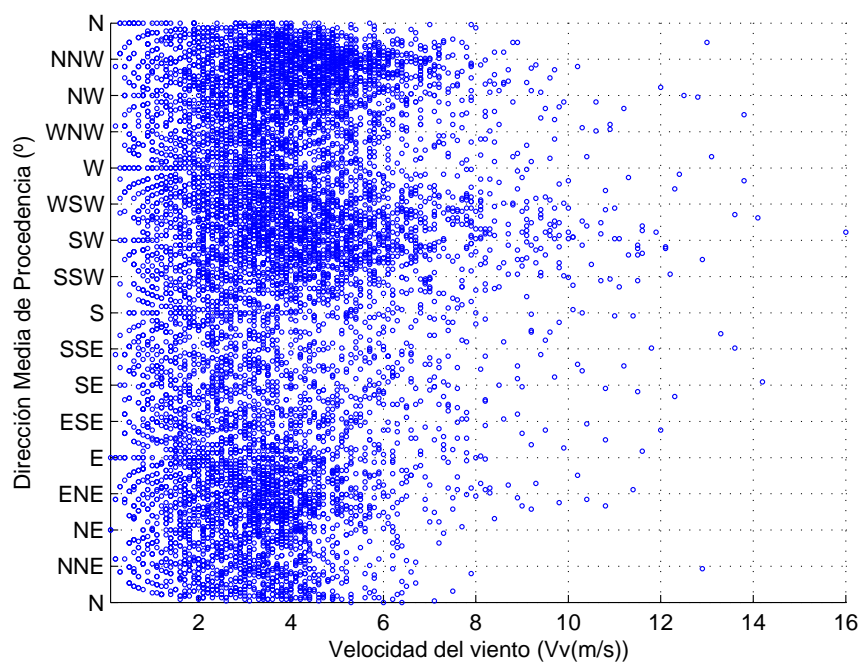


Figura A.18: Gráfico de dispersión  $V_v - \theta_v$ .

Se presenta a continuación la rosa de viento de los datos del punto SIMAR.

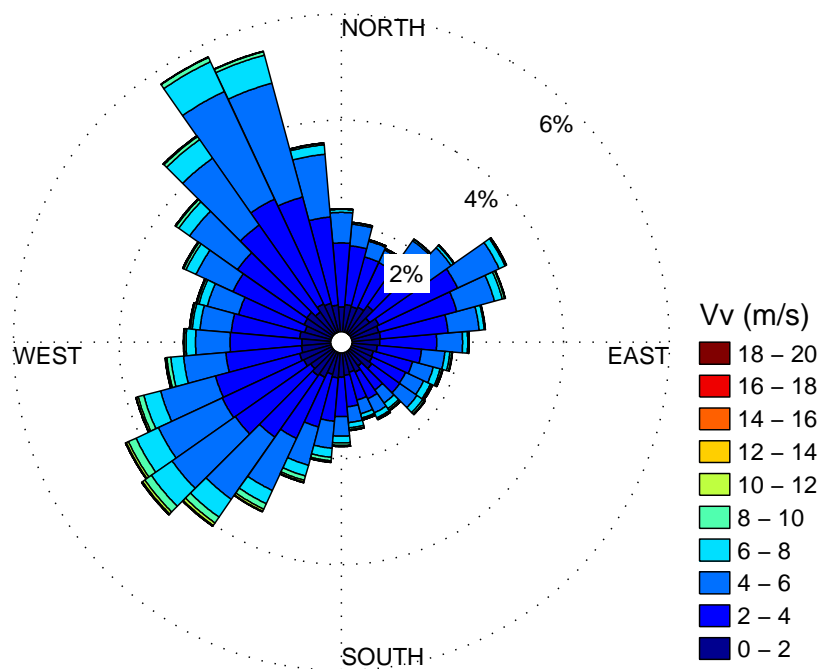


Figura A.19: Rosa de viento.

### Resumen de resultados parciales

Los resultados más reseñables de la descripción general del viento en profundidades indefinidas son:

- Rango de velocidades de viento entre 0 y 20 m/s.
- Las velocidades de viento más frecuentes están entre 2 y 4 m/s.
- Las direcciones de procedencia del viento más frecuentes son NNW y SW.

#### A.3.2. Régimen medio de $V_v$ en profundidades indefinidas

Se obtiene el régimen medio de velocidades de viento en profundidades indefinidas considerando todas las direcciones.

Todos los regímenes medios de velocidad de viento se ajustan a una distribución de probabilidad tipo Weibull cuya función de densidad viene representada por la ecuación A.1.

En la tabla A.10 se muestran los parámetros de ajuste del régimen medio de velocidad de viento obtenidos según la distribución de Weibull.

Parámetros:	a	b
	4.0638	2.0324

Tabla A.10: Parámetros de la distribución tipo Weibull para el régimen medio de velocidad de viento.

Una vez conocidos estos parámetros se calculan las funciones de densidad y distribución de probabilidad. En la figura A.20 se representa el histograma de frecuencias (datos reales) junto con la función de densidad de los datos ajustados según una distribución de Weibull (datos empíricos); esta gráfica permite conocer la probabilidad de ocurrencia de cada velocidad de viento. En la figura A.21 se encuentra representado el histograma de frecuencias acumuladas junto con la función de distribución que indica la probabilidad de no excedencia de cada velocidad de viento, es decir, la probabilidad de que dicha velocidad de viento no sea superada.

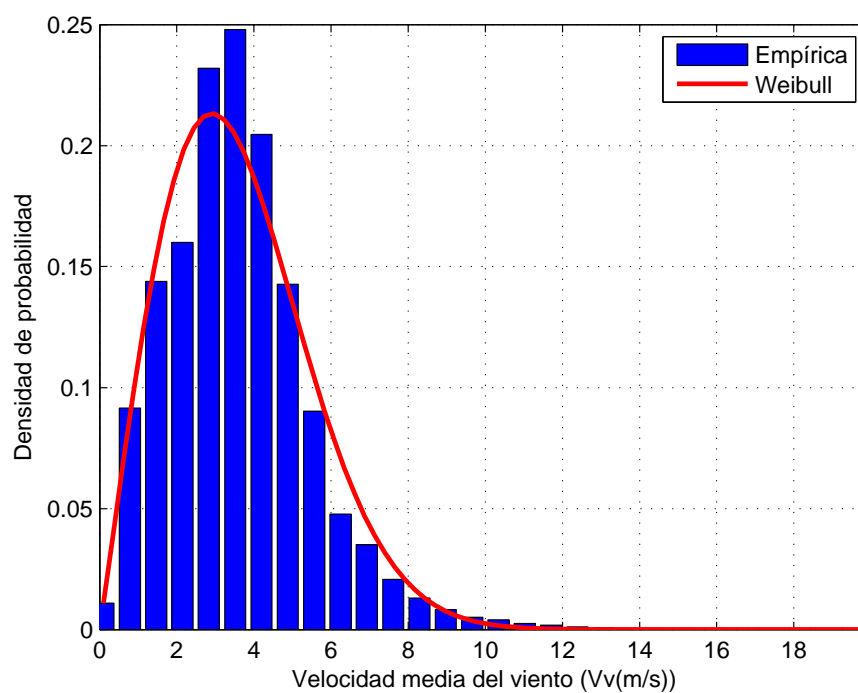


Figura A.20: Función de densidad tipo Weibull para el régimen medio de velocidad de viento.

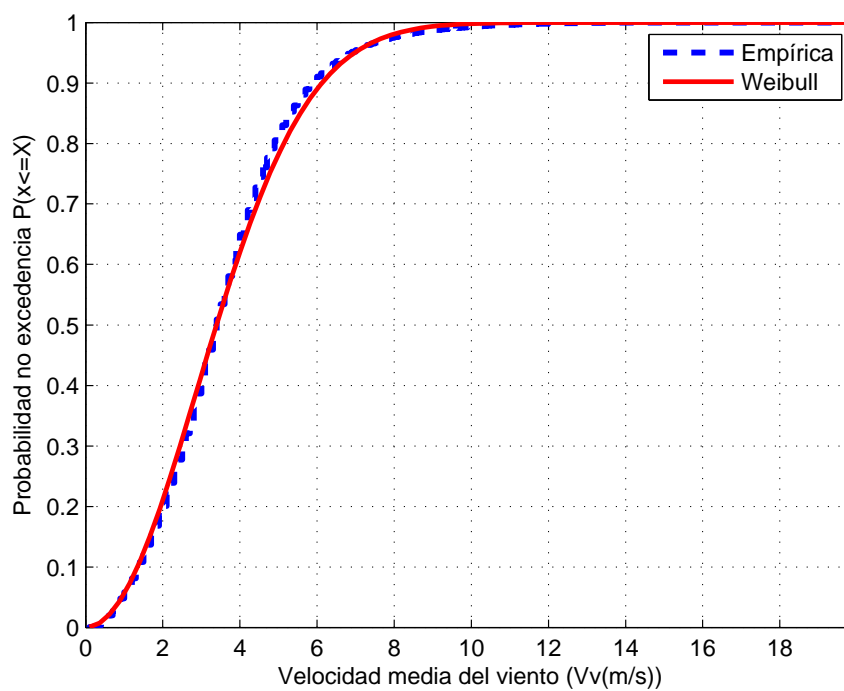


Figura A.21: Función de distribución tipo Weibull para el régimen medio de velocidad de viento.

### Resumen de resultados parciales

Como resumen del régimen medio para la velocidad de viento se presenta la tabla A.11.

Prob. No excedencia	Velocidad de viento ( $V_v$ (m/s))
50 %	3.5
85 %	5.5

Tabla A.11: Tabla resumen del régimen medio para la velocidad de viento.

#### A.3.3. Régimen extremal de $V_v$ en profundidades indefinidas

Para la obtención del régimen extremal se ha usado el método de Picos Sobre Umbral (POT, Peaks Over Threshold). Para ello se ha fijado la velocidad de viento umbral en 8.5 m/s, correspondiente al valor que es superado en menos del 1 %. Para garantizar la independencia estadística entre temporales, se ha supuesto que la duración mínima entre temporales debe ser superior a 48 horas. De esta manera se han obtenido 1283 eventos extremos respectivamente, en los 57 años meteorológicos analizados.

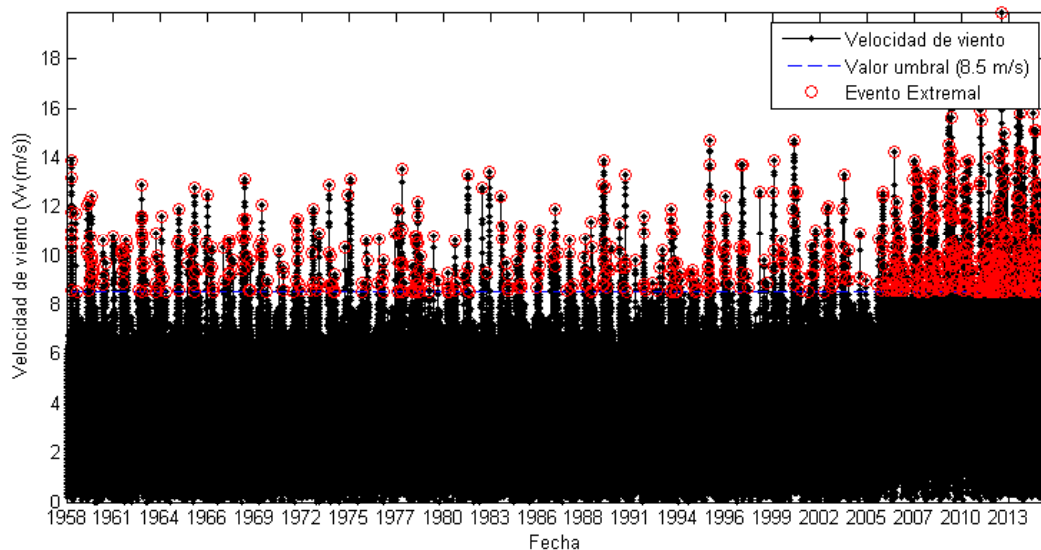


Figura A.22: Picos de velocidad de viento sobre umbral con  $V_{vu} = 8,5m$ .

Para caracterizar el régimen de picos sobre umbral, se utiliza la distribución de Valores Extremos Generalizada representativa del régimen. La forma general de la distribución utilizada es la mostrada en la ecuación A.2.

En la tabla A.12 se muestran los parámetros de ajuste del régimen extremal de velocidad de viento obtenidos según la distribución de Valores Extremos Generalizada.

$k$	$\sigma$	$\mu$	Distribución equivalente	Número de eventos
0.4670	0.8414	9.2621	Frechet	1283

Tabla A.12: Parámetros de la distribución tipo GEV para el régimen extremal de velocidad de viento.

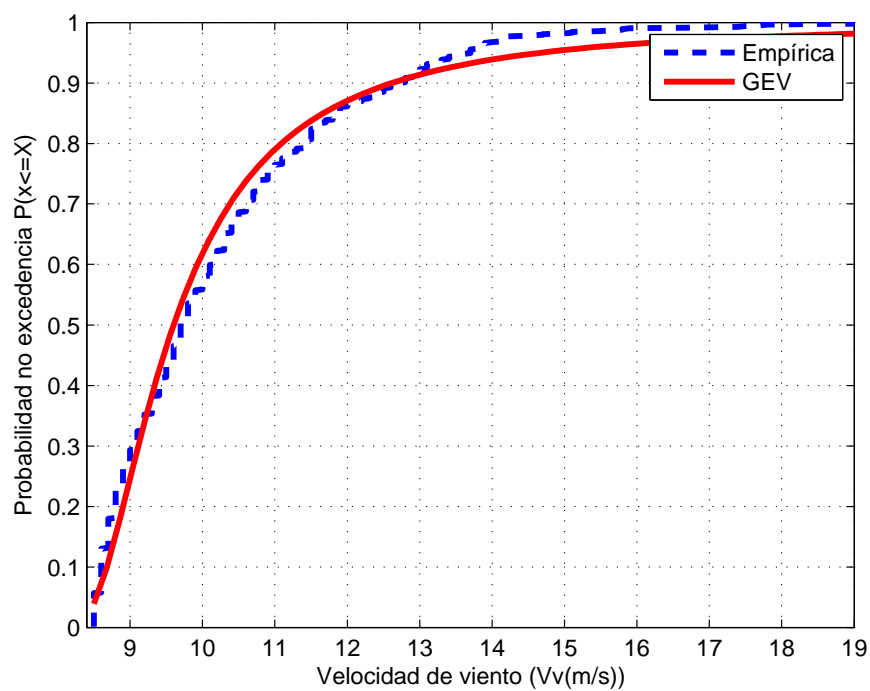


Figura A.23: Función de densidad tipo GEV para el régimen extremal de velocidad de viento.



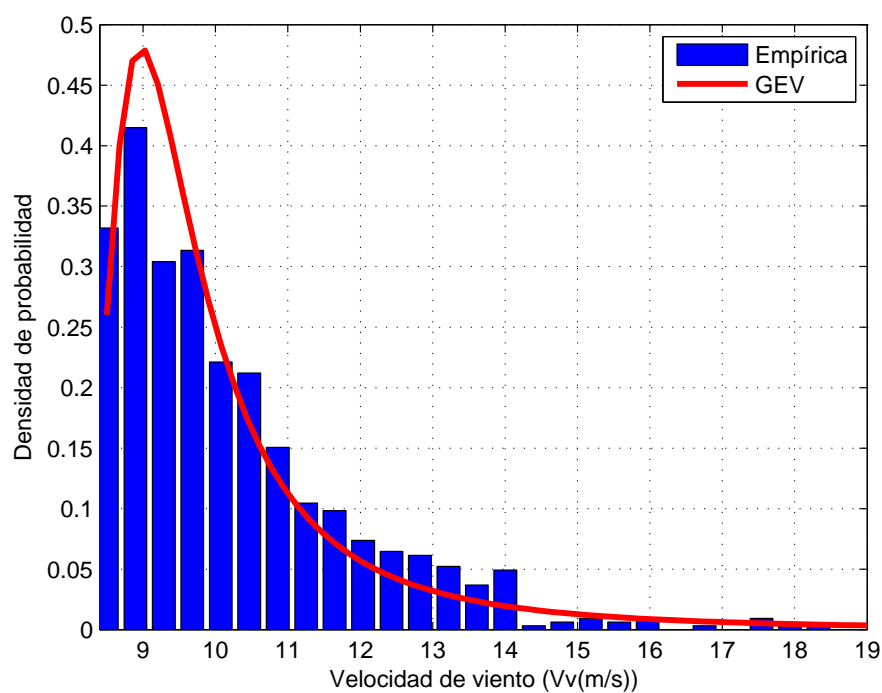


Figura A.24: Función de distribución tipo GEV para el régimen extremal de velocidad de viento.

**Resumen de resultados parciales** Como resumen del régimen extremal para la velocidad de viento se presenta la siguiente tabla:

Prob. No excedencia	Velocidad de viento (Vv(m/s))
50 %	9.5
85 %	12

Tabla A.13: Tabla resumen del régimen extremal para la velocidad de viento.



## Bibliografía

---

- (2001). Espacios Naturales Protegidos del litoral Andaluz. Consejería de Medio Ambiente.
- (2009). Plan de Usos de los Espacios Portuarios de la Ría del Piedras. Agencia Pública de Puertos de Andalucía.
- (2016). Dragado de la canal de la Ría del Piedras (Huelva). Agencia Pública de Puertos de Andalucía.
- Birkemeier, W. (1985). Field data on seaward limit of profile change. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 113(3):598 – 602.
- Borrego, J., Morales, J. A., y Pendón, J. (1992). Efectos derivados de las actuaciones antrópicas sobre los ritmos de crecimiento de la flecha litoral de El Rompido. *Geogaceta*, (11):89–92.
- Borrego, J., Morales, J. A., y Pendón, J. G. (1993). Holocene filling of an estuarine lagoon along the mesotidal coast of huelva: The Piedras river mouth, southwestern Spain. *Journal of Coastal Research*, 9:242 – 254.
- Borrego, J., Morales, J. A., y Pendón, J. G. (1995). Holocene estuarine facies along the mesotidal coast of huelva, southwestern Spain. *Spec. Public. Int. Ass. Sedimentol*, 24:151 – 170.
- Borrego, J. y Pendón, J. G. (1989). Caracterización del ciclo mareal en la desembocadura del río Piedras (Huelva). Technical report, Actas del XII Congreso Nacional de Sedimentología, Bilbao.
- CEDEX (2013). Estudio de la dinámica litoral, defensa y propuesta de mejor en las playas con problemas: Estudio de actuación del tramo de costa comprendido entre las desembocaduras de los ríos Guadiana y Guadalquivir. Technical report, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Costa (2016). La Junta licita el dragado del canal de acceso a la ría del Piedras por 327,000 euros. Andalucía Información. 14/04/2016.
- Dabrio, C. J. (1981). Sedimentary structures generated on the foreshore by migrating ridge and runnel systems on microtidal and mesotidal coas on S. Spain. Technical report, Dep. de Estratigrafía, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada (Spain).

- Dabrio, C. J. (1982). Historia y dinámica de nuestra costa. Technical report, Excmo. Ayuntamiento de Cartaya.
- Dabrio, C. J. (1989). Playas e Islas barrera-lagoon. Technical report, Consejo Superior de Investigaciones Científicas CSIC.
- Dabrio, C. J., Boersma, J., y Fernandez, J. (1980). Evolución sedimentaria de la flecha del Rompido (Huelva). Technical report, Actas del IX Congreso Nacional de Sedimentología, Salamanca.
- Davis, R. A. y Clifton, H. E. (1987). Sea-level change and the preservation potencial of wave-dominated and tide-dominated coastal sequences. *Sea-Level Fluctuations and Coastal Evolution*.
- De Jonge, V. N. (1992). Tidal flow and residual flow in the ems estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 34(1):1 – 22.
- Dean, R. G. y Dalrymple, R. A. (2001). *Coastal Processes with Engineering Applications*. Cambridge University Press.
- Deltares (2011). *Delft3D-FLOW. Simulation of Multi-dimensional Hydrodynamic Flow and Transport Phenomena, Including Sediments - User Manual*.
- Dyer, K. R. (1997). *Estuaries: A Physical Introduction*. Wiley.
- García, D. y Cáceres, L. (2012). Análisis de la evolución de la flecha litoral del rompido entre 1956 y 2009 mediante Digital Shoreline Analysis System (DSAS). Technical report, I Congreso Iberoamericano de Gestión Integrada de Áreas Litorales.
- Gómez, D. (2014). Restringida de nuevo la navegación en el acceso al Piedras por la falta de calado. [www.elrompido.info](http://www.elrompido.info). 14/07/2014.
- Hasselmann, K., Barnett, T., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D. E., Enke, K., Ewing, J., Gienapp, H., Hasselmann, D. E., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D. J., Richter, K., Sell, W., y Walden, H. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (jonswap). Technical report, Deutches Hydrographisches Institut.
- HIDTMA (2000). Estudio Integral de la Costa de Huelva. Technical report, Ministerio de Medio Ambiente.
- Landero, J. (2010). El balizamiento del Piedras tendrá otra ubicación tras el dragado. Huelva Información. 18/07/2010.
- Landero, J. (2012). Prisioneros en el Piedras. Huelva Información. 12/02/2012.
- Landero, J. (2013). El "éxito" para la appa del dragado del Piedras choca con la "falta de calado." expresada por los navegantes. Andalucía Información. 24/02/2013.
- Lesser, G., Roelvink, J. A., van Kester, J. A. T. M., y Stelling, G. S. (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. 51:883–915.

- Morales, J. A. (2012). Evolución morfodinámica de la desembocadura del río Piedras (Huelva, s.o. España): Monitorización y modelo matemático calibrado. *Consejería de obras públicas y transportes*.
- Morales, J. A. y Borrego, J. (2008). El litoral de Huelva : fisiografía y dinámica. *Geología de Huelva*, pages 28 – 34.
- Morales, J. A., Borrego, J., Jiménez, I., Monterde, J., y Gil, N. (2001). Morphostratigraphy of an ebb-tidal delta system associated with a large spit in the Piedras Estuary mouth (Huelva Coast, Southwestern Spain). *Marine Geology*, 172(3-4):225–241.
- Morales, J. A., Delgado, I., y Gutiérrez-Mas, J. M. (2015). Bedform variability and flow regime in a barrier-inlet system. The mesotidal Piedras mouth (Huelva, SW Spain). *Geologica acta*, 13(2):137–153.
- Nichol, S. L. y Boyd, R. (1993). Morphostratigraphy and facies architecture of sandy barriers along the eastern shore of Nova Scotia. *Marine Geology*.
- Ponce, V. (2011). El Piedras aún sin balizar, 7 meses tras el dragado. Odiel Información. 06/06/2011.
- Prandle, D. (2003). Relationships between tidal dynamics and bathymetry in strongly convergent estuaries. *Journal of Physical Oceanography*, 33(12):2738 – 2750.
- Tecnoambiente (2009). Evaluación del sistema hidrodinámico de la canal de la ría del Piedras. Technical report.
- Whitham, G. (1974). *Linear and nonlinear waves*. Wiley.
- Zarzuelo, C. (2012). *Modelado Hidrodinámico de la Bahía de Cádiz*. PhD thesis, Máster Interuniversitario de Hidráulica Ambiental, especialidad de Puertos y Costas.
- Zarzuelo, C., Díez-Minguito, M., Ortega-Sánchez, M., López-Ruiz, A., y Losada, M. A. (2015). Hydrodynamics response to planned human interventions in a highly altered embayment: The example of the Bay of Cádiz (Spain). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 167:75–85.
- Zarzuelo, C., López-Ruiz, A., Díez-Minguito, M., y Ortega-Sánchez, M. (2016). Tidal and subtidal processes in a constricted bay: observations and modelling. *Ocean Modelling*.